

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

LUCAS MARTINEZ DA COSTA

**PROPOSTA DE MÉTODO DE PROJETO PERFORMATIVO PARA EDIFÍCIOS
ENERGETICAMENTE EFICIENTES**

VITÓRIA
2020

LUCAS MARTINEZ DA COSTA

**PROPOSTA DE MÉTODO DE PROJETO PERFORMATIVO PARA EDIFÍCIOS
ENERGETICAMENTE EFICIENTES**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, na área de concentração Construção Civil.

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Cristina Engel de Alvarez

Coorientador: Prof. Dr. Jarryer Andrade De Martino

VITÓRIA

2020

Ficha catalográfica disponibilizada pelo Sistema Integrado de Bibliotecas - SIBI/UFES e elaborada pelo autor

M385p Martinez da Costa, Lucas, 1995-
Proposta de método de projeto performativo para edifícios energeticamente eficientes / Lucas Martinez da Costa. - 2020.
166 f. : il.

Orientadora: Cristina Engel de Alvarez.
Coorientador: Jarryer Andrade De Martino.
Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico.

1. projeto arquitetônico. 2. consumo de energia. 3. métodos de simulação. 4. construção civil. I. Engel de Alvarez, Cristina. II. Andrade De Martino, Jarryer. III. Universidade Federal do Espírito Santo. Centro Tecnológico. IV. Título.

CDU: 624

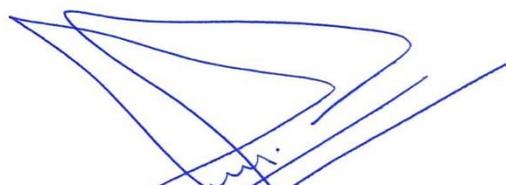
UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO

PROPOSTA DE MÉTODO DE PROJETO PERFORMATIVO PARA EDIFÍCIOS ENERGETICAMENTE EFICIENTES

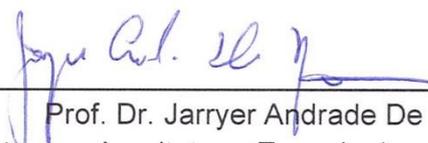
Lucas Martinez da Costa

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Engenharia Civil do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Espírito, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, área de Construção Civil.

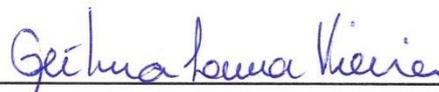
Aprovada no dia **03 de março de 2020** por:



Profa. Dra. Cristina Engel de Alvarez
Doutora em Arquitetura e Urbanismo
Orientadora – UFES



Prof. Dr. Jarryer Andrade De Martino
Doutor em Arquitetura, Tecnologia e Cidade
Coorientador – UFES



Profa. Dra. Geilma Lima Vieira
Doutora em Engenharia Civil
Examinadora Interna – UFES



Profa. Dra. Edna Aparecida Nico Rodrigues
Doutora em Arquitetura e Urbanismo
Examinadora Externa - UFES

Aos meus pais, Sidney Aguiar da Costa e
Denise Meireles Martinez da Costa.

A minha noiva, Ingrid Nunes Rodrigues.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Ele, nosso bom Deus, por ter me concedido paciência e sabedoria durante esses anos de mestrado. A minha mãe e rainha, Nossa Senhora, por me consolar e fortalecer nos momentos de dificuldade. Agradeço também, de modo especial, a todos os professores que me auxiliaram e com tanta boa vontade compartilharam o conhecimento comigo. A prof.^a Dr.^a Cristina Engel de Alvarez que mesmo de diante de todas as dificuldades e desafios, topou enfrentar essa batalha comigo, me motivando a seguir em frente. Ao prof. Dr. Jarryer Andrade De Martino, pela sua atenção e dedicação, desde a graduação, com seus comentários e dicas extremamente preciosos. A todos do Latecae, de forma particular a prof.^a Dr.^a Joyce Carlo e seus alunos Matheus e Mario, que me acolheram e compartilharam suas experiências em simulações computacionais na utilização do *Ladybug Tools*, ainda pouco difundido no Brasil. Pela amizade e rica troca de conhecimentos cos companheiros fiéis do LPP: Anderson Fraga, Gabriela Bolssoni, Patryck Machado, Filipe Galina. Agradeço de forma especial a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa concedida para o desenvolvimento da pesquisa com dedicação exclusiva, sem a qual não seria possível. Por fim, sou grato a todos os meus amigos do Ministério Universidades Renovadas e familiares pelo incentivo e apoio.

Comece a olhar ao seu redor. Seus próprios olhos e as provas acumuladas pelas ciências sociais devem convencê-lo rapidamente (se isso ainda for necessário) de que a revolução digital não pode ser descartada como mero modismo ou exagero. A transformação tecnológica que tem sido proclamada aos quatro ventos, anunciada como algo que “sacudirá nossas vidas como um tufão do Pacífico”, é bem real.

William John Mitchell (2002)

RESUMO

O crescimento progressivo do setor da construção civil tem caracterizado as edificações, nas últimas décadas, como uma das maiores responsáveis pelo consumo global de energia elétrica. No Brasil, a ascensão dos impactos nos âmbitos comercial e de serviços, como é o caso dos edifícios de escritórios, são mais expressivos devido a utilização majoritária de eletricidade em detrimento a outras fontes de energia. Fachadas predominantemente envidraçadas, ausência de sombreadores e gastos consideráveis com refrigeração, retratam algumas de suas práticas ineficientes. Diante desse cenário tem se tornado cada vez mais necessária novas abordagens relativas à métodos e técnicas para a elaboração de projetos com ênfase na eficiência energética. Embora seja notável os avanços tecnológicos, ainda há um lento processo de inserção de ferramentas computacionais como aporte no desenvolvimento de edifícios de alto desempenho na realidade profissional dos projetistas. Como forma de repensar o processo projetual, o método de projeto performativo tem sido fomentado no meio científico não apenas por proporcionar a associação de ferramentas digitais, mas também por direcionar seus procedimentos a fim de obter edifícios com um melhor desempenho energético. Desse modo, o objetivo desta pesquisa foi propor uma metodologia de projeto performativo que relacione modelagem paramétrica, otimização e avaliação de desempenho energético para edifícios de escritórios. Os procedimentos se dividiram em quatro etapas sendo a primeira a revisão bibliográfica na exploração da abordagem teórica; e as seguintes relacionadas à geração, otimização e a sistematização dos dados dos experimentos para a formulação da proposta. Como resultado do ensaio projetual, obteve-se uma melhoria significativa de 31% no consumo geral de energia primária e uma redução de 54% na demanda por refrigeração nos edifícios que adotaram as características do projeto performativo. A abordagem se demonstrou eficiente, pois foi capaz de alcançar bons resultados e relacionar diversas variáveis em um curto período de tempo. Devido a esses fatores, acredita-se que seja possível implementar o método na concepção de edifícios de escritórios, tendo como possibilidades futuras a associação de *softwares* que permitam o detalhamento técnico e desenvolvimento das etapas finais de projeto.

Palavras-chave: Metodologia de projeto. Projeto performativo. Desempenho energético nas edificações. Edifícios de escritórios.

ABSTRACT

The growing of civil construction in the last decades has defined the buildings as one of the main responsible for the world's electricity consumption. In Brazil, an increase in impacts in the commercial and services sector, such as office buildings, are more significant due to the majority use of electricity to the detriment of other energy sources. In addition, fully glazed façades, absence of shades and considerable expenses with cooling systems, show some of their inefficient practices. In view of this scenario new approaches to methods and techniques for architectural design with an emphasis on energy efficiency become more and more necessary. Although the technological advances are remarkable, there is still a slow process of insertion of computational tools as input in the development of high performance buildings in the professional reality of designers. As one way to rethink the design process, the performative design method has been promoted in academic studies not only by providing the association of digital tools, but also by directing their procedures to obtain buildings with better energy performance. Thus, the aim of this research was to propose a performative design methodology that relates parametric modeling, optimization and energy performance evaluation for office buildings. The procedures were divided into four stages, the first being the literature review in exploring the theoretical approach; and the following ones related to the generation, optimization and systematization of experimental data for the proposal formulation. The result of this design test, there was a significant 31% improvement in overall primary energy consumption and a 54% reduction in cooling demand in buildings that adopted the performative design characteristics. The approach was efficient, since it achieved good results and to relate several variables in a short period of time. Due to these factors, it's believed that's possible to implement the method in the design of office buildings, having as future possibilities the association of software that allows the technical detailing and development of the final design stages.

Keywords: Design method. Performative design. Building energy performance. Office buildings

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Abstração no processo criativo.	23
Figura 2 – Sequência cíclica de decisões em projeto.	25
Figura 3 – Comunicação entre as etapas da sequência de decisões.	26
Figura 4 – Modelos simbólicos de projeto digital propostos por Oxman (2006).	30
Figura 5 – Modelos simbólicos de projeto performativo: (a) baseado em otimização; (b) baseado na geração.	33
Figura 6 - Fachada principal do Qatar National Convention Centre.	34
Figura 7 – Processo esquemático de concepção baseado no projeto performativo.	35
Figura 8 – Esquema geral do processo de projeto performativo.	36
Figura 9 – Criação de um cubo em VPL: na tela esquerda, visualização no <i>software Rhinoceros</i> e na direita, programação no <i>Grasshopper</i>	38
Figura 10 – Papel do projetista na elaboração do projeto: (a) método tradicional, atuação de forma direta, (b) sistema generativo, atuação indireta como intermediador de processos.	40
Figura 11 – Esquema geral de aplicação dos procedimentos de otimização.	41
Figura 12 - Evolução das publicações relacionadas a otimização na base de dados Scopus.	42
Figura 13 - Evolução das publicações relacionadas a eficiência energética. Dado obtido da base de dados referenciais Scopus a partir dos termos ("building energy performance" OR "building energy efficiency") para os anos de 1980 a 2016.	49
Figura 14 - ENCE para edificações comerciais, de serviço ou públicas. (a) ENCE geral; (b) ENCE parcial da envoltória; (c) ENCE parcial da envoltória e do sistema de iluminação; (d) ENCE parcial da envoltória e do sistema de condicionamento de ar.	52
Figura 15 - Etapas do desenvolvimento do projeto arquitetônico que abrangem o método de projeto proposto.	54
Figura 16 - Modelo simbólico de projeto performativo adotado na pesquisa.	55
Figura 17 - Mapa conceitual da pesquisa.	56
Figura 18 - Eixos temáticos da revisão bibliográfica.	57
Figura 19 – Principais <i>softwares</i> e ferramentas utilizados para a geração e representação dos modelos computacionais de projeto.	62
Figura 20 - Classificação dos modelos computacionais.	63

Figura 21 - Localização da ZOP 4 dentro da Enseada do Suá.	65
Figura 22 – (a) Carta solar de Vitória com destaque para a orientação sul e (b) rosa dos ventos com frequência de ocorrência dos ventos.....	72
Figura 23 - Método de simplificação da modelagem.	76
Figura 24 - Setorização dos ambientes no pavimento tipo esquemático.	78
Figura 25 – Esquema relacional entre os parâmetros da configuração geométrica do sistema generativo de projeto.	79
Figura 26 - Código da modelagem energética.	81
Figura 27 - Aba de configurações do Opossum.	84
Figura 28 - Aba com os critérios de término da otimização.....	85
Figura 29 - Aba com configuração para programação escrita para experts.....	85
Figura 30 - Aba com os resultados.....	86
Figura 31 - Planejamento de experimentos.....	93
Figura 32 – Monitoramento de convergência da proposta de otimização restrita.	98
Figura 33 – Monitoramento de convergência da proposta de otimização abrangente.	99
Figura 34 – Interface e possibilidades de tratamento de dados no <i>Design Explorer</i>	101
Figura 35 – (a) plotagem das combinações das variáveis da proposta de otimização restrita, com destaque em azul para a que obteve o melhor desempenho; (b) representação gráfica do edifício correspondente.....	102
Figura 36 – (a) plotagem das combinações das variáveis da proposta de otimização abrangente, com destaque em azul para a que obteve o melhor desempenho; (b) representação gráfica do edifício correspondente.....	103
Figura 37 – Consumo de energia primária e classificação do nível de eficiência energética dos edifícios em suas respectivas condições.	104
Figura 38 – Resultado das combinações obtidas por meio da otimização.	106
Figura 39 – Consumo mensal e total de energia elétrica por sistema na de otimização restrita e sua respectiva condição de referência.	107
Figura 40 - Consumo mensal e total de energia elétrica por sistema no edifício de otimização abrangente e sua respectiva condição de referência.	109
Figura 41 – Gráficos com a plotagem das variáveis relacionadas ao sombreadores na otimização restrita e seus efeitos no consumo de energia primária.	110

Figura 42 - Gráficos com a plotagem das variáveis relacionadas as aberturas, materiais e vidros na de otimização abrangente e seus efeitos no consumo de energia primária	111
Figura 43 – Gráficos de dispersão das variáveis na otimização abrangente e seus efeitos no consumo de energia primária.	114
Figura 44 - Resumo dos resultados da análise de sensibilidade.....	115
Figura 45 – Fluxograma geral da metodologia proposta.	116
Figura 46 - Definição esquemática da proposta do método de projeto performativo.	119

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Ferramentas de otimização com abordagem de objetivo único que possuem interface com o <i>Grasshopper</i>	46
Quadro 2 - Estratégia de pesquisa.....	58
Quadro 3 - Edifícios de escritórios construídos dentro do recorte temporal do levantamento.....	64
Quadro 4 - Variáveis de resposta dos experimentos.....	91
Quadro 5 - Fatores de ruído nos experimentos.....	92
Quadro 6 - Diretrizes propostas para a metodologia.....	118

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características do edifício genérico.	67
Tabela 2 - Detalhamento dos parâmetros do modelo genérico.....	68
Tabela 3 - Detalhamento dos parâmetros do modelo de referência.....	70
Tabela 4 - Detalhamento dos parâmetros do edifício otimizado.....	75
Tabela 5 - Coeficiente de redução do consumo de energia primária da classe D para a A (CRCEPDD-A) para edifícios de escritório.....	88
Tabela 6 - Classificação do nível de eficiência energética.	89
Tabela 7 - Fatores controláveis nos experimentos.....	91
Tabela 8 - Fatores constantes nos experimentos.....	91
Tabela 9 - Fatores constantes nos experimentos.....	92
Tabela 10 - Estimativa dos efeitos dos parâmetros na otimização restrita.....	112
Tabela 11 - Estimativa dos efeitos dos parâmetros de otimização restrita no CEP.....	113

LISTA DE SIGLAS

AVAC - Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado
BEST – *Building Energy Software Tools*
CAD – *Computer Aided Design*
CEP – Consumo de Energia Primária
COMDUSA - Companhia de Melhoramentos e Desenvolvimento Urbano
DRS – *Design Research Society*
EGO – *Efficient Global Optimization*
ENCE – Etiqueta Nacional de Conservação de Energia
EP – Estratégia de pesquisa
FF – Fator de Forma
GA – *Genetic Algorithm*
GLP - Gás Liquefeito de Petróleo
INMETRO – Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
LBNL – *Laurence Berkley National Laboratory*
OBS – Otimização baseada em Simulação
PDU – Plano Diretor Urbano
RBF – Radia basis Function
RBFOpt – Radial Basis Function Optimization
RTQ-C - Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas
SA – *Simulated Annealing*
VAV - *Variable Air Volume*
VPL – *Visual Programming Languages*
VRF - *Variable Refrigerant Flow*
ZOP4 – Zona de Ocupação Preferencial 4

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	18
1.1	HIPÓTESE	20
1.2	OBJETIVOS	20
1.2.1	Geral	20
1.2.2	Específicos	21
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	22
2.1	MÉTODO DE PROJETO PERFORMATIVO	22
2.1.1	O processo de projeto arquitetônico	22
2.1.2	O projeto arquitetônico digital	26
2.1.3	O projeto baseado no desempenho	31
2.2	MODELAGEM PARAMÉTRICA	36
2.2.1	Características	36
2.2.2	O sistema generativo de projeto	39
2.3	OTIMIZAÇÃO BASEADA EM SIMULAÇÃO.....	40
2.3.1	Algoritmos e ferramentas	44
2.4	DESEMPENHO ENERGÉTICO DAS EDIFICAÇÕES.....	47
2.4.1	Avaliação e classificação do desempenho energético	50
3	METODOLOGIA	54
3.1	ETAPA 1: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	57
3.2	ETAPA 2: GERAÇÃO E REPRESENTAÇÃO	59
3.2.1	Escolha do software	59
3.2.2	Classificação dos edifícios	62
3.2.3	Levantamento dos edifícios de escritórios	63
3.2.4	Caracterização do edifício genérico	65
3.2.5	Caracterização do edifício de referência	69
3.2.6	Caracterização do edifício otimizado	70
3.2.7	Modelagem e estruturação do sistema generativo de projeto	75
3.3	ETAPA 3: OTIMIZAÇÃO E AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO ENERGÉTICO	
	82	
3.3.1	Pré-processamento	82
3.3.1.1	Caracterização do problema de otimização	82

3.3.1.2	Definição do objetivo da otimização de desempenho energético	82
3.3.2	Execução da Otimização	83
3.3.3	Avaliação de desempenho energético	86
3.3.4	Planejamento de experimentos	89
3.4	ETAPA 4: SISTEMATIZAÇÃO DOS DADOS	94
3.4.1	Análise de sensibilidade.....	94
3.4.2	Organização do método de projeto	95
4	RESULTADOS	96
4.1	O SISTEMA GENERATIVO DE PROJETO	96
4.2	OTIMIZAÇÃO	96
4.3	DESEMPENHO ENERGÉTICO DOS EDIFÍCIOS.....	103
4.4	ANÁLISE DE SENSIBILIDADE	109
4.5	PROPOSIÇÃO DO MÉTODO DE PROJETO PERFORMATIVO.....	115
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	120
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	122
	APÊNDICES	133

1 INTRODUÇÃO

O setor da construção civil tem despendido, nas últimas décadas, amplos impactos com relação ao consumo de energia elétrica a nível mundial, com uma representatividade de 31% dos gastos associado a expectativa de crescimento de 0,9% ao ano até 2040 (INTERNATIONAL..., 2019). Ante a esse cenário de transição, a emergência de novas abordagens relativas à métodos e técnicas para a elaboração de projetos, com ênfase na eficiência energética, tem se tornado cada vez mais necessárias (NEGENDAHL, 2015). Contudo, apesar dos avanços significativos da tecnologia digital, a utilização de ferramentas computacionais que permitem a aplicação de procedimentos de parametrização, simulação e otimização como aporte na concepção de edifícios de alto desempenho energético ainda passam por um processo de lenta inserção na realidade profissional, tanto dos arquitetos como dos engenheiros.

À vista disso, uma das principais potencialidades que impulsionam a penetração da computação no cerne da prática projetual diz respeito a estruturação e a mediação das informações. Pode-se dizer que diferente da prática convencional, o projeto digital estabelece uma conexão peculiar entre o projetista, as ferramentas computacionais e os atributos das edificações, a fim de complementar ou até mesmo estender o intelecto humano na resolução de problemas (OXMAN, 2006). Na modelagem paramétrica, por exemplo, suas características conceituais como geometria associativa, os esquemas topológicos relacionais e a reedição de processos auxiliam na correlação de parâmetros de elementos arquitetônicos que afetam diretamente o a eficiência energética (JABI, 2013; WOODBURY, 2010). Essa capacidade se deve a criação dos sistemas generativos de projeto, os quais se definem pelo código de programação da modelagem, com a intermediação e encadeamento lógico das variáveis para a geração de soluções na concepção dos edifícios.

Outra abordagem em ascensão no meio científico, relacionada a tecnologia na construção, diz respeito aos algoritmos de otimização baseados em simulação e sua aplicabilidade em pesquisas que se pautam no desempenho energético. Como objetivo, o processo de otimização visa alcançar um resultado ótimo (ou mais perto do ideal) para uma determinada condição de desempenho tendo em vista o campo de

soluções determinado pelo projetista. Para que isso ocorra é necessário que os modelos computacionais de projeto sejam submetidos a métodos de iteração¹ automatizada, por meio de técnicas matemáticas ou estatísticas (EVINS, 2013; MACHAIRAS; TSANGRASSOULIS; AXARLI, 2014; ØSTERGÅRD; JENSEN; MAAGAARD, 2017). A vantagem é que muitas dessas ferramentas possuem interoperabilidade com *softwares* de modelagem paramétrica, o que intensifica a capacidade de exploração de opções de projeto para uma mesma problemática. Além disso, vale ressaltar que é indispensável a utilização de regulamentos ou instrumentos que possam normatizar a avaliação e a classificação do nível de desempenho energético das edificações na etapa de projeto.

No Brasil, somente a partir de 2001 com a chamada “Crise do Apagão”, que ocasionou a interrupção no fornecimento de energia elétrica devido à falta de investimentos e longos períodos de seca (JARDINI *et al.*, 2002), que se observou alguns avanços quanto às políticas de eficiência energética. Dentre outras iniciativas surgidas, destaca-se, em 2003, o lançamento do PROCEL Edifica pelo governo brasileiro por meio do Plano de Ação para Eficiência Energética em Edifícios para reduzir o consumo de eletricidade no setor da construção civil (WONG; KRÜGER, 2017). Após alguns anos em desenvolvimento foram lançadas instruções normativas com a função não só de avaliar, mas também de certificar os projetos, como o Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas (RTQ-C) e seus documentos complementares (BRASIL, 2018). Embora se tenha tido progressos, a situação da construção civil no Brasil ainda é preocupante, sendo que os edifícios residenciais e comerciais são responsáveis por cerca de 42% do consumo de energia elétrica no país (BRASIL, 2019).

Segundo a Empresa de Pesquisa Energética (BRASIL, 2019a), o setor de comércio e serviços brasileiro tem passado por uma evolução histórica (2005 a 2018) com um aumento de cerca de 3% na demanda por eletricidade. Outro fator importante é que apesar das edificações residenciais serem responsáveis por um alto consumo, uma parcela considerável de sua energia também provém de outras fontes como Gás

¹ Os métodos de iteração são procedimentos utilizados na computação para gerar uma sequência de soluções para um determinado problema por meio de sucessivos cálculos. Geralmente são delimitados critérios de finalização, de acordo com os objetivos do projetista, que permitem a estagnação do processo e a obtenção dos resultados.

Liquefeito de Petróleo (GLP) e lenha. Enquanto isso, os edifícios comerciais e públicos empregam de forma majoritária a energia elétrica, especialmente no que diz respeito aos sistemas de refrigeração para o condicionamento térmico dos ambientes. Apesar de todas as problemáticas, de acordo com a International Energy Agency (2019), o Brasil tem dado importantes passos para o processo de redução do consumo de energia primária se comparado com outros países da América Latina.

Nessa perspectiva, a associação da potencialidade das ferramentas digitais juntamente com as exigências de desempenho energético no setor de construções tem impelido os projetistas a repensarem o processo de criação e elaboração de edifícios. O projeto performativo, ou seja, aquele que explora o desempenho, se insere nesse âmbito – por exemplo – como um possível caminho na mudança da prática projetual a partir de suas três principais formulações nas quais se fundamenta: 1) modelo geométrico, que se relaciona com a transformação, geração e parametrização das formas; 2) processos avaliativos, nos quais se integram a geometria e as técnicas de otimização baseadas em simulação desempenho que transformam e geram o modelo; 3) interatividade do projetista, que exerce o papel de mediador dos processos (OXMAN, 2008). Diante dessas premissas, torna-se factível o desenvolvimento de metodologias que se adequem não só as exigências de cada projeto, mas que também se apresentem como uma alternativa viável para a estruturação de edifícios energeticamente eficientes.

1.1 HIPÓTESE

A hipótese desta pesquisa é que é possível propor um método de projeto performativo que seja capaz de proporcionar, ainda no estágio inicial de projeto, um aporte para o desenvolvimento de edifícios de escritórios energeticamente eficientes.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Geral

O objetivo desta pesquisa é propor uma metodologia de projeto performativo que relacione modelagem paramétrica, otimização e avaliação de desempenho energético para edifícios de escritórios.

1.2.2 Específicos

1. Investigar os procedimentos que caracterizam a prática de projeto performativo;
2. Elaborar, analisar e avaliar os resultados da aplicação dos conceitos do projeto performativo na elaboração de edifícios;
3. Definir diretrizes que auxiliem na caracterização e aplicação da proposta do método de projeto.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

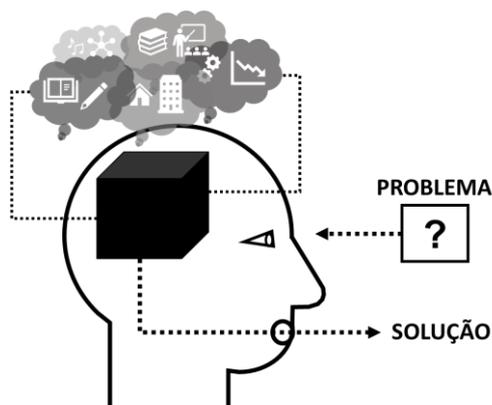
A presente revisão bibliográfica buscou explorar na literatura científica os processos e conceitos que permeiam o projeto arquitetônico em sua essência, bem como o seu desenvolvimento com a adoção das tecnologias digitais. Investigou-se também os aspectos que caracterizam a prática de projeto performativo e técnicas como a modelagem paramétrica e a otimização, frequentemente utilizadas em estudos da área. Além disso, foram abordados temas relativos à eficiência energética nas edificações, e métodos existentes para avaliação e classificação de desempenho como os sistemas de etiquetagem energética. Portanto, o intuito deste capítulo foi estabelecer uma visão global sobre cada temática a fim de possibilitar a compreensão da pesquisa desenvolvida nesta dissertação.

2.1 MÉTODO DE PROJETO PERFORMATIVO

2.1.1 O processo de projeto arquitetônico

Existem, no campo da arquitetura, maneiras distintas de se desenvolver e descrever as etapas que compõem um processo de projeto. Essa variação se deve tanto em função do perfil do projetista como da natureza do problema delimitado pelas necessidades do cliente. A diversidade de meios para se conceber um edifício conduz, portanto, a procedimentos que podem ter um caráter mais subjetivo ou racional, tendo em vista que não existem métodos rígidos ou universais no processo de criação (KOWALTOWSKI *et al.*, 2006). No entanto, Broadbent (1971) constatou, ainda no século passado, uma dificuldade entre os projetistas em descrever seus métodos de projeto, pois utilizavam primordialmente a criatividade, interpretando-a como uma atividade abstrata e de difícil explicação (Figura 1). Por outro lado, as discussões sobre a legitimidade da arquitetura como ciência levaram ao desenvolvimento de abordagens mais sistemáticas, a fim de estabelecer procedimentos que pudessem caracterizar o método de projeto arquitetônico.

Figura 1 - Abstração no processo criativo.



Fonte: adaptada de Broadbent (1971).

Além dos atributos enfatizados por Vries e Watger (1991) que definiam um processo mal estruturado², em aberto³ e com a inexistência de um ponto de partida⁴ como características comuns consideradas nas investigações dessa área, começaram a emergir e formalizar estudos sobre métodos de projeto a partir da década de 1960. A *Conference on Design Methods* realizada em 1962, na cidade de Londres, é considerada como a primeira conferência na qual a preocupação principal se relaciona com os métodos e processos no ato de projeto. O objetivo era estabelecer um meio pelo qual o projeto pudesse ser ensinado como um processo criativo associado a procedimentos sistemáticos (SLANN, 1963). Outras conferências como *The Design Method* (GREGORY, 1965), *Design Methods in Architecture* (BROADBENT; WARD, 1969) e *Architectural Design* (BAYAZIT; INCEOGLU, 1978) foram importantes pois colocaram em evidência o processo de projeto arquitetônico.

Na mesma época, grupos como a *Design Research Society*⁵ (DRS) começaram a surgir, com atuação na área de pesquisas em projeto, de modo a fomentar estudos científicos que se desenvolvem até hoje por meio do periódico acadêmico *Design Studies*⁶. Um dos trabalhos com maior influência nesta época foi o de Asimov (1962), o qual destaca a premissa de que é viável a distinção entre as atividades desenvolvidas durante o projeto, e que essas são essenciais para a sua compreensão.

² Possuem definições implícitas, ou seja, não se conhecem os meios e os fins da solução;

³ Não existe uma solução que seja completamente ideal;

⁴ Cada projetista estabelece seu ponto inicial (volumetria, partido, etc.) para posteriormente aperfeiçoar e avançar no desenvolvimento do projeto.

⁵ <https://www.designresearchsociety.org/cpages/home>

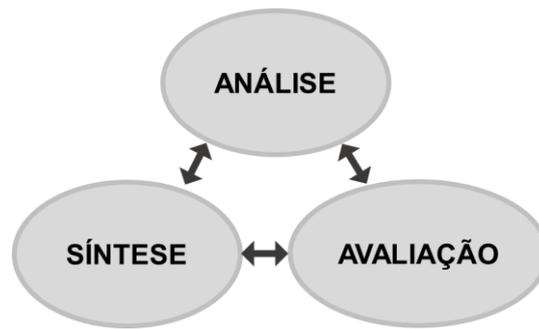
⁶ <https://www.journals.elsevier.com/design-studies>

A hipótese principal se define pela existência de duas escalas de operações: uma vertical e outra horizontal. A primeira segue uma sequência cronológica de passos (estudo de viabilidade, projeto preliminar etc.); já a segunda constitui-se como um ciclo (análise, síntese, avaliação e decisão, otimização, revisão e implementação). Apesar da proposta ter sido desenvolvida para aplicação na engenharia, seus conceitos influenciaram os métodos de projeto arquitetônico.

Nessa perspectiva, Jones (1963) classificou a sistemática do processo de projeto em arquitetura em três estágios distintos: 1) análise, que lista os requisitos e as especificações de desempenho; 2) síntese, a qual cria soluções para cada especificação; e 3) avaliação, que verifica a precisão com a qual os critérios foram atendidos. Page (1963), por sua vez, contrapõe a lógica sequencial do processo destacado por Jones, pois acredita que nos casos práticos há vários momentos que o processo de projeto adquire um caráter cíclico. Segundo o mesmo autor, para uma melhor compreensão de cada atividade, é necessário que se faça uma distinção entre processo de projeto e sequência de decisões. (BROADBENT, 1973) estabeleceu, então, na *Design Methods in Architecture*, um acordo para diferenciar as seguintes definições dos conceitos: 1) O processo de projeto é uma sequência inteira de eventos que vai das primeiras definições até sua realização final; 2) a sequência de decisões é um *loop* individual em cada etapa do processo de projeto contendo fases de análise, síntese e avaliação.

Diante dessa caracterização, Lawson (2005) demonstra que o ponto de partida de um processo de projeto – seja ele um esboço ou um detalhe – não é um elemento unicamente intrínseco ao projetista, mas varia conforme as características e as configurações do problema. Desse modo, a sequência de atividades desenvolvidas deve permitir uma flexibilidade e interações em ciclos para obter resultados e soluções mais satisfatórias (Figura 2). Embora as metodologias de projeto variem muito, considera-se que as etapas de análise, síntese e avaliação são fundamentais e comuns em quaisquer processos de projeto em arquitetura. Sendo assim, a elucidação desses elementos é fundamental para a compreensão do processo de projeto como um todo.

Figura 2 – Sequência cíclica de decisões em projeto.



Fonte: adaptado de Lawson (2005).

A análise se constitui como a tarefa pela qual é decomposto o problema arquitetônico. Nesse sentido, procura-se conhecer a sua natureza, características e relações, por meio de investigações pontuais que direcionam para uma compreensão global. É na análise que também são definidos as metas, objetivos, critérios de desempenho e restrições relativas ao cliente e a localidade (ANDRADE, 2012). Com frequência, durante o desenvolvimento do projeto, surgem novos problemas que requerem uma revisão das análises para a criação de soluções se adequem aos parâmetros. Por fim, destaca-se que esta etapa é caracterizada por ser um processo racional de obtenção e cruzamento de informações para que possam dar o aporte necessário para os estágios de decisão subsequentes.

A síntese relaciona-se à fase de concepção e criação, onde se apresentam um conjunto de soluções que possam atender as problemáticas definidas pela análise. De acordo com Kalay (2004), a síntese é constituída de etapas que vão desde a geração da geometria, escolha dos materiais, iluminação até a conformação do edifício como um todo. Jones (1963) afirmava ainda no século passado que uma das técnicas mais úteis durante esse processo é o *brainstorming*. Nesse caso, uma pessoa ou uma equipe se reúnem para agrupar experiências e ideias que, posteriormente analisadas, auxiliam no processo de geração de soluções. O que deve ficar claro, conforme Lawson (2005) é que não existe uma solução ótima para um projeto, mas sim soluções que sejam mais aceitáveis para aquele contexto.

No que diz respeito à etapa de avaliação, pode-se afirmar que seu objetivo visa garantir a escolha de uma solução que seja mais adequada para o problema. Para tal, conforme afirma Jones (1963), é necessário detectar as falhas do processo antes de sua produção, a fim de evitar que as alterações se tornem onerosas para o projetista.

Alguns critérios como estética, comportamento dos usuários e a percepção do edifício são complexos de serem avaliados e julgados. No entanto, como essa fase se caracteriza por ser um processo com um cerne racional, são utilizados métodos com aplicação de critérios e restrições como as da estatística e da simulação, por exemplo (JONES, 1971; MARKUS, 1971). Por fim, deve-se destacar também a representação, a qual compreende o processo de interação e comunicação da análise, síntese e avaliação. Ela permite a codificação por símbolos e desenhos possibilitando que a informação seja apreendida (Figura 3).

Figura 3 – Comunicação entre as etapas da sequência de decisões.



Fonte: adaptado de Andrade (2012).

Toda a evolução e transformação pelas quais os métodos de projeto passaram ao longo de sua trajetória inicial permitiu não só o estabelecimento de duas gerações – uma que se caracterizava pela sistematização de processos e outra pelo envolvimento dos usuários – mas também a sua definição como uma área específica da ciência (CROSS, 2003; RITTEL; WEBBER, 1973). As metodologias de projeto se caracterizam, portanto, como processos organizados para comunicar a tarefa de criação em etapas racionais que auxiliam o projetista no enfrentamento de problemas mais complexos, ao mesmo tempo que se obtém resultados mais precisos (KOWALTOWSKI *et al.*, 2006). Desse modo, é possível detectar minimamente a lógica intrínseca por trás do fenômeno projetivo, de forma a auxiliar na compreensão dos modelos mentais de projetos, os quais, com o auxílio da tecnologia têm desenvolvido novos conceitos e formulações.

2.1.2 O projeto arquitetônico digital

O avanço da computação, principalmente após a Segunda Guerra Mundial, trouxe transformações tecnológicas visíveis nos diversos campos de conhecimento do meio científico. Na construção civil, a digitalização dos processos penetrou no cerne da

prática projetual, com a mediação de informações e criação de ferramentas, de modo que foi possível o desenvolvimento de novas metodologias. Nesse sentido, uma das questões centrais quando se trata da prática do projeto digital é que, de fato, ele é um fenômeno único e se configura como uma nova forma de projetar, não sendo apenas a realização de procedimentos com o auxílio de novas mídias (OXMAN, 2006). São modificadas a interação entre o homem e o projeto, porém, as competências humanas ainda são necessárias para as decisões e critérios técnicos. Para alguns a eficiência dos aparatos tecnológicos tem contribuído para a mudança do processo criativo e para a elaboração da forma arquitetônica (KOLAREVIC, 2003; MEREDITH, 2008; STEELE, 2001; SZALAPAJ, 2003), para outros eles têm tirado a capacidade e a autonomia do arquiteto no ato projetar (ANDRADE, 2012).

O que se deve levar em consideração, segundo Terzidis (2006), quando se diz respeito ao uso do computador no projeto é que existem duas categorias quanto a natureza de sua função: 1) informatização e 2) computação. A primeira se apresenta como o ato de inserir, processar e armazenar as informações dentro de um sistema computacional. Essa abordagem remonta a características da automação, mecanização, digitalização, dentre outras atividades. Por outro lado, a computação trata sobre a exploração de processos indeterminados, pouco claros e muitas vezes, mal definidos. Seu comportamento possui uma natureza exploratória, tendo em vista que em seus processos o computador busca emular ou estender intelecto humano.

Uma das evidências que reforçam as transformações da prática projetual nas últimas décadas são o desenvolvimento de novos métodos de síntese e avaliação. Como destacado no tópico anterior, uma das características da síntese é a geração das formas arquitetônicas. Nessa perspectiva, segundo Kalay (2004), os métodos baseados em ferramentas no estágio de concepção podem ser classificados em três categorias: 1) métodos processuais; 2) heurísticos e 3) evolucionários. O primeiro é caracterizado por ser o pioneiro na etapa de síntese do projeto, o qual podem ser aplicadas condições para a geração de formas de modo rápido, preciso e consistente Kalay (2004). Em relação ao método heurístico, sua utilização tem sido mais frequente desde a década de 1960, em muitos casos para o planejamento de espaço e configuração de leiaute (LIGGETT, 2000). Sua particularidade caracteriza-se pelo fato de ter um raciocínio não exato, seguindo uma visão global e holística do problema. Já

os métodos evolucionários, conforme destaca Mitchell (1999), são pesquisas, aprendizagens e otimizações inspiradas na biologia evolutiva.

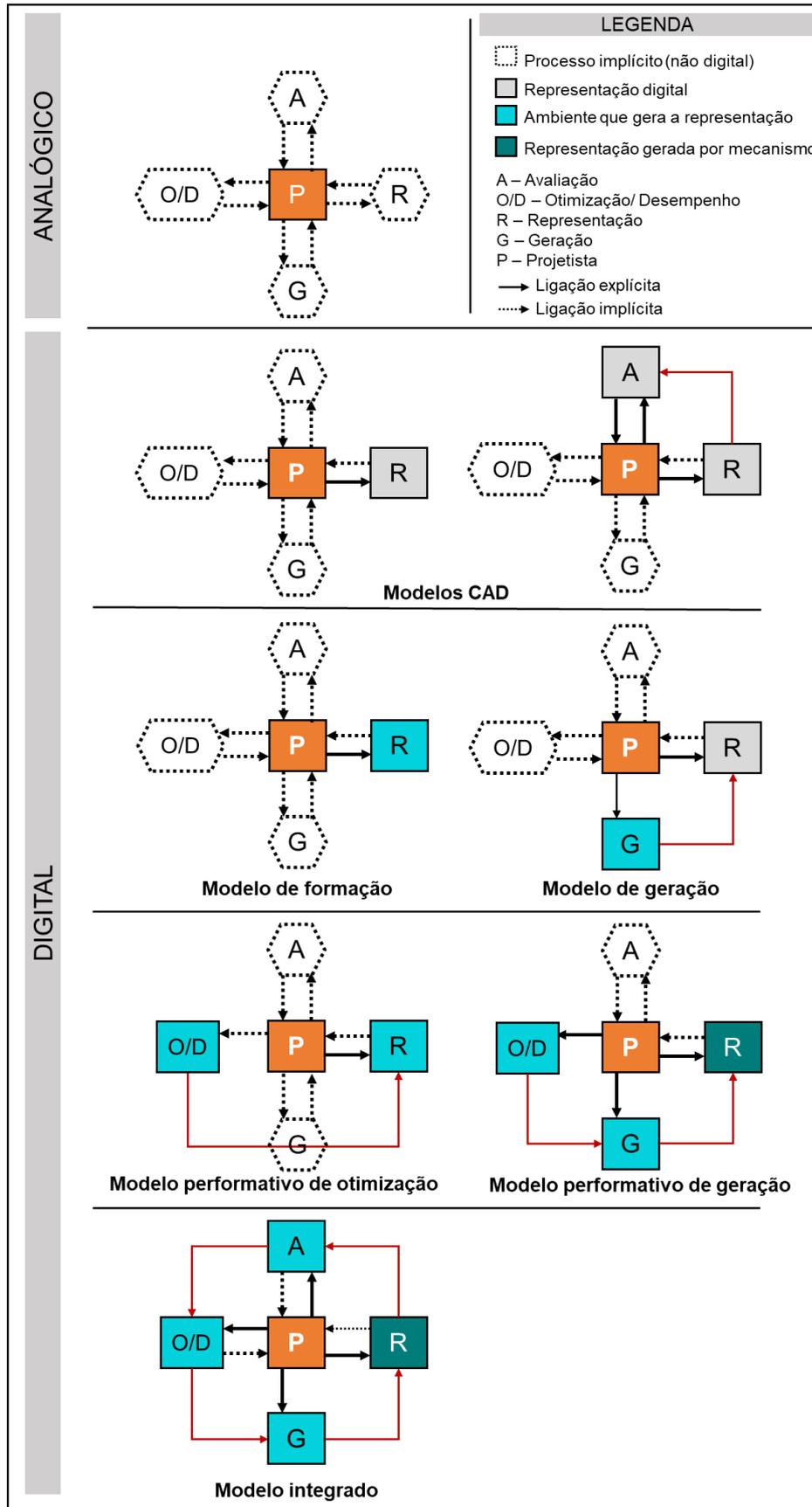
Os procedimentos de avaliação, essenciais para sequência de decisões dentro do processo de projeto, adquiriram uma importância singular com a adesão do computador, pois possibilitaram maior precisão e segurança na verificação dos requisitos de desempenho. Dois métodos são utilizados na prática de projeto contemporânea: 1) previsão; e 2) julgamento. Os métodos de previsão são aqueles relacionados as áreas especializadas do conhecimento (energia, acústica, estrutura, etc.) em que são obtidos os dados específicos das soluções (KALAY, 2004). Nesses casos, podem ser usados procedimentos de cálculo, raciocínio, simulação ou extrapolação. Quanto ao método de julgamento, seu objetivo é obter uma avaliação global do desempenho, de forma a verificar as áreas que precisam de melhorias. Nota-se, portanto, que a inserção de ferramentas computacionais trouxe novas interações e por consequência, diferentes modelos de projeto.

Pode-se dizer que, neste contexto, conforme os avanços tecnológicos se incorporaram nos projetos na década de 1990, modelos teóricos (ou simbólicos) foram sendo desenvolvidos tendo em vista a necessidade de um discurso sobre a influência dos meios digitais (OXMAN, 2006). Ainda segundo a mesma autora, não existe uma formulação precisa sobre a temática, no entanto, foi proposta uma estrutura com cinco modelos que caracterizam os novos paradigmas do projeto digital os quais são: modelo CAD, de formação, geração, performativos e integrado. Cada um desses modelos possui quatro componentes básicos que simbolizam as atividades tradicionais de projeto: 1) representação, relacionada com a mídia representacional; 2) geração, caracterizada por processos generativos e de interação; 3) avaliação, que destaca o procedimento avaliativo e de julgamento; e 4) desempenho, o qual inclui considerações programáticas e contextuais (OXMAN, 2006).

Nessa estrutura representacional, a definição do processo cognitivo da informação pode ocorrer de maneira implícita ou explícita. No processo de projeto convencional, desde o século passado, a exposição do conhecimento é feita de forma implícita devido a sua relação com a inspiração, criatividade e os meios dos quais se utiliza (BROADBENT, 1971). Já a forma explícita, no conceito computacional, se baseia em formulações, implementações que interagem de forma direta com o conhecimento.

Desse modo, no processo de adaptação para o projeto digital os modelos *Computer Aided Design* (CAD) foram os pioneiros na substituição do papel pelas mídias digitais. Em continuidade, os modelos de formação possibilitaram ao projetista uma estrutura geométrica e formal bem definida permitindo altos níveis de interação e controle. Por outro lado, os modelos generativos se constituem pelo fornecimento de mecanismos computacionais como aporte para os processos de geração (OXMAN, 2006). Os modelos simbólicos estão ilustrados na Figura 4, sendo que o performativo e o integrado serão descritos em detalhes no tópico subsequente.

Figura 4 – Modelos simbólicos de projeto digital propostos por Oxman (2006).



Fonte: adaptado de Andrade (2012).

2.1.3 O projeto baseado no desempenho

A prática do projeto digital tem perpetrado uma série de mudanças nos processos tradicionais de projeto, com a revisão de conceitos e reformulações de procedimentos metodológicos. Tudo isso tem implicado, de forma direta, na remodelação dos conhecimentos do projetista e na configuração de novas funções na área profissional (ANDRADE, 2012). Assim sendo, uma importante questão considerada no desenvolvimento de projetos tem sido o desempenho. No sentido mais amplo, o termo costuma ser associado a eficiência a ser alcançada por determinado quesito. Contudo, o modo como o desempenho é compreendido na arquitetura é comumente contraditório e associa-se a temas distintos (KOLAREVIC, 2005). Um ponto de convergência, que permite sua caracterização, é determiná-lo por meio de uma avaliação que considere a forma ou outros atributos físicos do modelo (KALAY, 1999). O interesse atual no desempenho do edifício como elemento paradigmático de projeto deve-se, em suma, ao surgimento da sustentabilidade como uma importante questão atrelada a aspectos socioeconômicos, tecnológicos e culturais (KOLAREVIC, 2004).

É necessário ressaltar que o projeto baseado no desempenho não deve ser visto apenas como uma maneira de enfrentar problemas práticos, mas também de conciliar objetivos que, em geral, são conflitantes de forma criativa e eficaz (KOLAREVIC, 2004). Diante desse cenário, foi adotado o termo “performativo” para descrever projetos que suportam a transformação e geração de modelos geométricos e auxiliam na avaliação analítica do desempenho com base em simulações de condições físicas como cargas solares, estruturais, consumo de energia, dentre outros (OXMAN, 2008). Sendo assim, a morfogênese⁷ performativa em sua perspectiva teórica conduz a transição do paradigma de projeto do ato de “fazer a forma” para “encontrar a forma” (*form finding*). Como exemplo desse conceito pode-se citar a pesquisa de Konis, Gamas e Kensek (2016) em que são obtidas diversas soluções inesperadas a partir de regras e parâmetros ditados pesquisadores.

Há, porém, de se distinguir as duas categorias que abarcam as definições de desempenho: a “arquitetura performativa” e o “projeto performativo”. A característica fundamental (e quase que evidente) é que uma trata dos edifícios já consolidados e a

⁷ Relaciona-se à origem da forma.

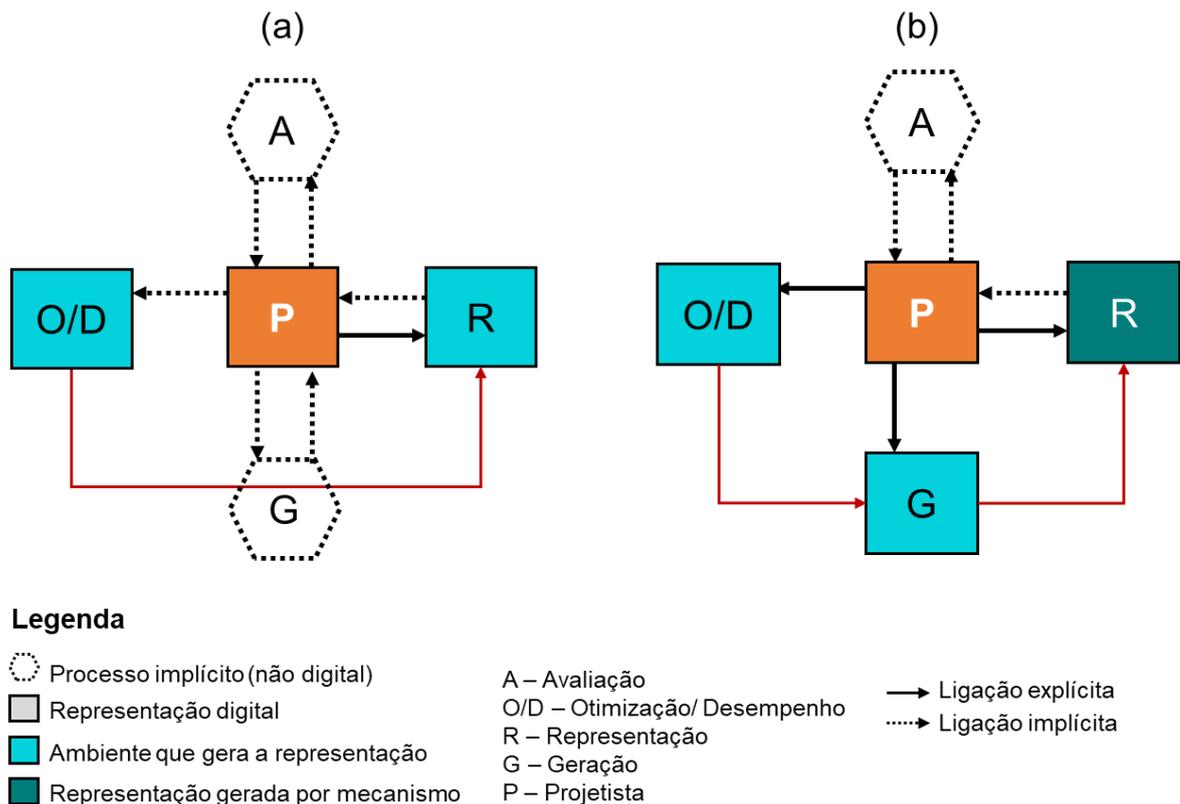
outra dos processos de projeto. Kolarevic (2005) faz uma distinção da arquitetura performativa baseado em três conceitos: o primeiro se relaciona a “arte performativa” em que o espaço urbano se torna um “palco” para “encenação” dos edifícios; a segunda se refere ao movimento, de modo que a arquitetura se torna dinâmica; já o terceiro ponto envolve questões socioeconômicas, em que a arquitetura se converte em um elemento potencializador do local. No projeto performativo – assim como já foi abordado anteriormente – o desempenho se torna um importante componente. Nesses casos, os elementos da configuração geométrica, assim como os outros parâmetros, passam por procedimentos de otimização para atingir os objetivos estabelecidos.

Algumas práticas de projeto contemporâneas, como por exemplo as simulações CAD, são distintas da abordagem performativa. As ferramentas convencionais têm como princípio a simulação e avaliação de um objeto, geralmente em um determinado nível de detalhamento, sendo raramente utilizados no estágio de concepção do projeto. As tecnologias atuais, por outro lado, permitem integrar processos de formação – na etapa de síntese – com simulações de desempenho. Assim sendo, pode-se dizer que a maioria dos métodos atuais não são morfogenéticos, ou seja, é o próprio projetista que modifica e adapta o modelo para obter soluções otimizadas (OXMAN, 2008). Além disso, a autora também destaca que um grande salto para modificar essa realidade tem sido o amplo desenvolvimento de sistemas de modelagem paramétrica. As formulações desse, por meio da geometria associativa, permitem o estabelecimento de relações e dependências dos elementos do modelo com a possibilidade de controle das características topológicas.

Deve-se destacar então, três características que são fundamentais para formulações de projetos performativos: 1) modelo geométrico, que se relaciona com a transformação, geração e parametrização das formas; 2) processos avaliativos, nos quais se integram a geometria e as técnicas de otimização que transformam e geram o modelo; 3) interatividade do projetista, que exerce o papel de mediador dos processos (OXMAN, 2008). Diante dessas premissas, podem se desenvolver metodologias como as que se estruturam dentro de dois modelos de projeto performativo: o de otimização e o de geração (Figura 5). No primeiro, as técnicas não só avaliam, mas também propõem modificações segundo os critérios de desempenho

estipulados. Já no modelo de geração não se avalia apenas a solução, mas também são geradas novas propostas, por meio dos parâmetros (ANDRADE, 2012). Em tal caso, portanto, são adotados sistemas generativos, para a geração automatizada das modificações.

Figura 5 – Modelos simbólicos de projeto performativo: (a) baseado em otimização; (b) baseado na geração.



Fonte: adaptado de Andrade (2012).

No que diz respeito ao modelo integrado – assim como o próprio significado da palavra sugere – os processos de geração, formação, avaliação e desempenho se associam de forma definitiva (ANDRADE, 2012). Apesar de inserir dentro do contexto performativo é frequentemente representado como um caso a parte por possuir maior grau de automatização. Oxman (2006) considerava o modelo como uma especulação futura do projeto digital, realidade que tem sido gradualmente transformada pela aplicação de suas características na academia e até mesmo em situações reais. Por exemplo, pode-se verificar os conceitos do projeto performativo no *Qatar National Convention Centre* da Sasaki + Partners (Figura 6). Os projetistas utilizaram procedimentos de geração e análise de formas, além de incluir critérios de eficiência

energética e sustentabilidade para o edifício. De acordo com Sasaki (2005), no processo de geração, todos os critérios do projeto arquitetônico e estrutural foram atendidos com eficiência máxima.

Figura 6 - Fachada principal do Qatar National Convention Centre.



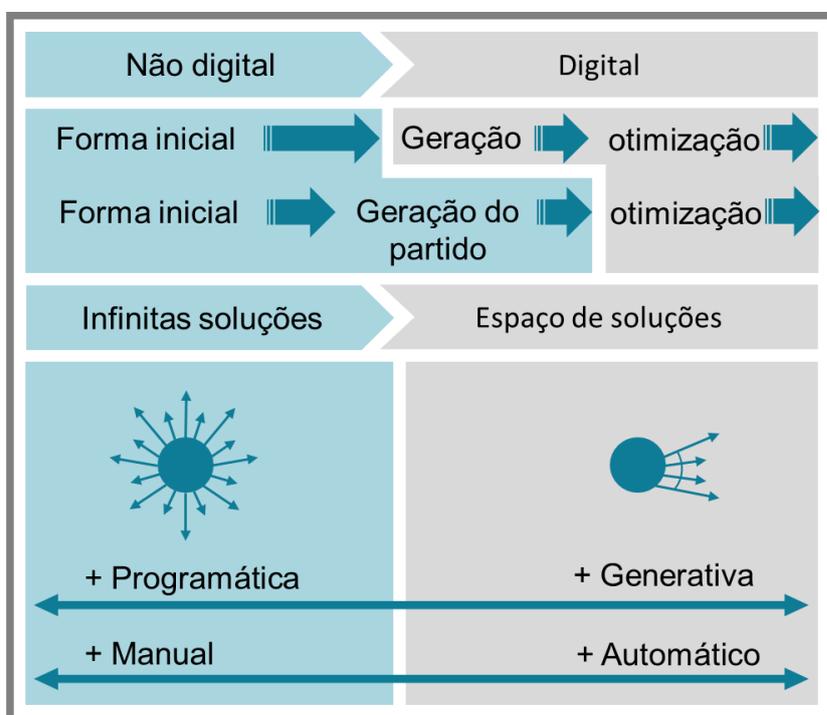
Fonte: (ARCHIDAILY, 2013).

No meio acadêmico, a produção de pesquisas tem crescido nos últimos anos, com a proposição de metodologias que visam o desenvolvimento de edifícios com alto desempenho. Muitas abordagens como a de Rezaee e outros (2019); Feng, Lu e Wang (2019); Wang e Malkawi (2019); Fang e Cho (2019) têm direcionado o seu foco para a etapa inicial de projeto nas diversas perspectivas do desempenho na arquitetura. O que se deve notar é que, mesmo diante das diferenças, a aplicação de ferramentas que possibilitam a modelagem paramétrica e a otimização são comuns, e trazem em si novas alternativas para a resolução de problemas. Ainda que tenham diferenças pontuais, os processos de projeto performativo ocorrem de modo semelhante respeitando a mesma estrutura conceitual.

Segundo Andrade (2012), durante a concepção arquitetônica a forma inicial se origina de construções mentais que divagam para o uso de sistemas digitais baseados em

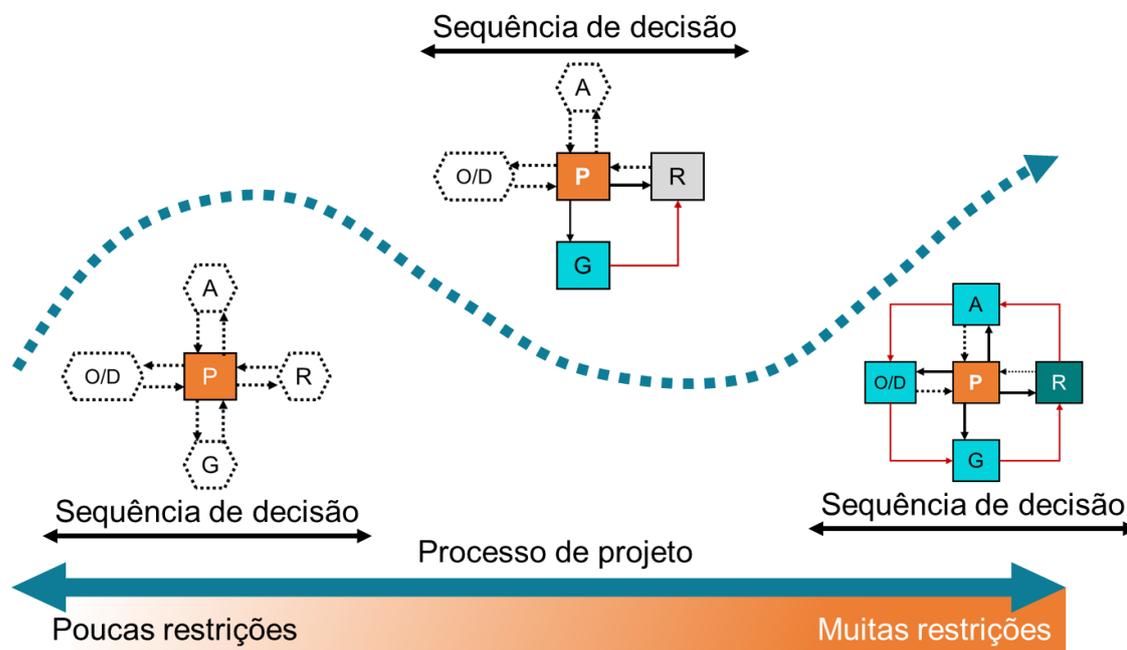
algoritmos, passando a explorar os espaços de soluções por meio da forma já concebida (Figura 7). O autor ainda reforça que o processo de projeto é composto por diversas sequências de decisão e conforme se avançam as etapas, maiores são os números de restrições impostas (Figura 8). É importante ressaltar também que o fluxo de informações necessárias para o desenvolvimento do projeto pode ocorrer tanto de forma analógica como digital dependendo do seu nível de automatização. Considera-se, portanto, que as características aqui destacadas possibilitam um aporte necessário para a prática do projeto performativo bem como para possíveis formulações metodológicas.

Figura 7 – Processo esquemático de concepção baseado no projeto performativo.



Fonte: adaptado de Andrade (2012).

Figura 8 – Esquema geral do processo de projeto performativo.



Fonte: adaptado de Andrade (2012).

2.2 MODELAGEM PARAMÉTRICA

2.2.1 Características

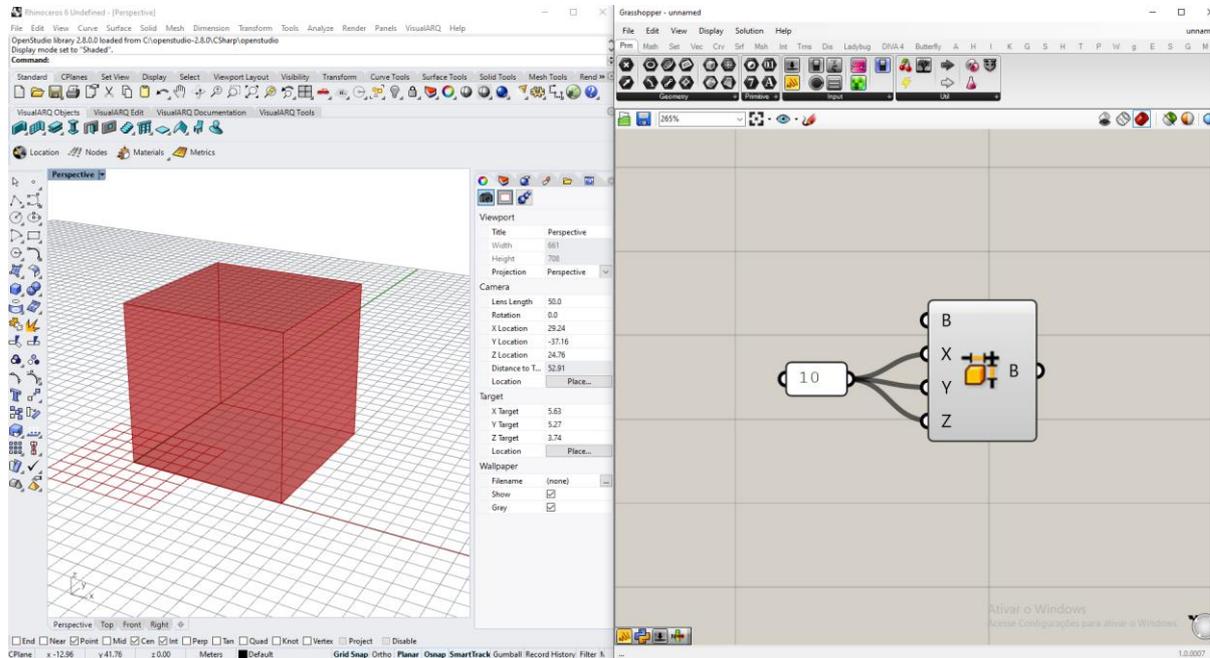
Dentre as diversas particularidades do método performativo na prática do projeto digital, a modelagem paramétrica adquire um caráter singular quanto a flexibilidade e inter-relação de parâmetros na elaboração de modelos computacionais dos edifícios. Isso se deve às suas características fundamentais, as quais são ancoradas no conceito da geometria associativa, no estabelecimento de esquemas topológicos relacionais e na reedição de processos (JABI, 2013; WOODBURY, 2010). Uma das principais diferenças para os sistemas tradicionais de modelagem é que, nesses casos, as partes do projeto se relacionam e mudam de maneira coordenada sem que o projetista precise manipular os elementos de forma direta (WOODBURY, 2010). Tendo isso em vista, é cada vez mais visível as transformações na etapa de concepção do projeto tanto pelo desenvolvimento de novas ferramentas assim como pela aplicação das técnicas de parametrização.

Segundo Jabi (2013), para a elaboração de uma modelagem paramétrica, é necessário que se tenha como premissa processos baseados em pensamentos

algorítmicos que permitam definir e expressar o conjunto de regras nas quais se estabelece o projeto. Esse novo modo de pensar foi descrito por Oxman (2017) como *parametric design thinking*, ou seja, pensamento paramétrico de projeto. A autora ainda destaca que partes do processo criativo do projeto que eram elaboradas por meio do lápis e papel agora tem sido gradualmente substituídos pelo modo algorítmico de resolução de problemas dos computadores. Isso não significa a perda de autonomia do projetista, muito menos que esboços e croquis não são mais utilizados, mas que há uma tendência crescente no uso de *softwares* que empregam os algoritmos para resolver, organizar ou explorar problemas com maiores complexidades (TERZIDIS, 2006). O pensamento algorítmico, na concepção de projetos, pode ser definido, portanto, como um conjunto de regras de um código fonte, com instruções explícitas, que iniciam os processos computacionais para a geração de formas digitais (OXMAN, 2017).

Essa abordagem fornece um novo paradigma para a arquitetura, com uma visão mais sistêmica, dinâmica e adaptável dos processos de projeto (COATES, 2010). Apesar de suas potencialidades, ainda há uma carência de estudos recentes que tentam compreender ou explicar a inserção dos algoritmos na concepção de edifícios, como é o caso de Terzidis (2006) e Burry (2011). Embora não seja uma realidade para muitos projetistas, na modelagem paramétrica, a configuração inicial do projeto parte da elaboração de *scripts* (códigos) com o uso de *Visual Programming Language* (VPL), conhecidas como linguagem de programação visual ou linguagens de programação diagramática. De acordo com Celani e Vaz (2012) as VPLs permitem aos usuários criarem e manipularem elementos gráficos sem usar códigos em linha. Desse modo, são usadas representações analógicas dos algoritmos caracterizadas como “componentes”, conforme ilustra a Figura 9, tornando o processo mais intuitivo para profissionais que não são da área da computação, como é o caso dos engenheiros e arquitetos.

Figura 9 – Criação de um cubo em VPL: na tela esquerda, visualização no *software Rhinoceros* e na direita, programação no *Grasshopper*.



Fonte: elaborado pelo autor (2019).

Uma das interfaces mais amigáveis para o desenvolvimento de modelos paramétricos é o *Grasshopper*⁸, editor de algoritmos do *software Rhinoceros 3D* (WORTMANN; TUNÇER, 2017; YU, RONGRONG; GERO; GU, 2015). Nele é possível tanto a geração e a representação gráfica, como também aplicação de diferentes tipos de linguagem de programação (textual ou visual), tendo como centro a VPL. Segundo Kheiri (2018) o programa é o mais utilizado quando se refere a estudos científicos realizados na etapa inicial de projeto. Eltaweel e Su (2017), por exemplo, otimizaram o controle das venezianas em edifícios de escritório por meio da parametrização, com o objetivo de obter melhores índices de iluminação natural; Ercan e Elias-Ozkan (2015) propuseram um método para a geração e simulação de elementos de sombreamento como forma de aumentar a iluminação útil dos ambientes; já Lobaccaro e outros.(2018) experimentaram a parametrização do edifício para minimizar a produção de gases de efeito estufa. Há diversas possibilidades de

⁸ O Grasshopper é um editor de algoritmos gráficos integrado ao Rhinoceros 3D pertencente a empresa Robert Mcneel & Associates. A sua interface permite a elaboração de programação computacional de forma intuitiva sem requerer conhecimentos específicos, permitindo aos usuários construir formulários e sistemas de geração de geometria de seus projetos.

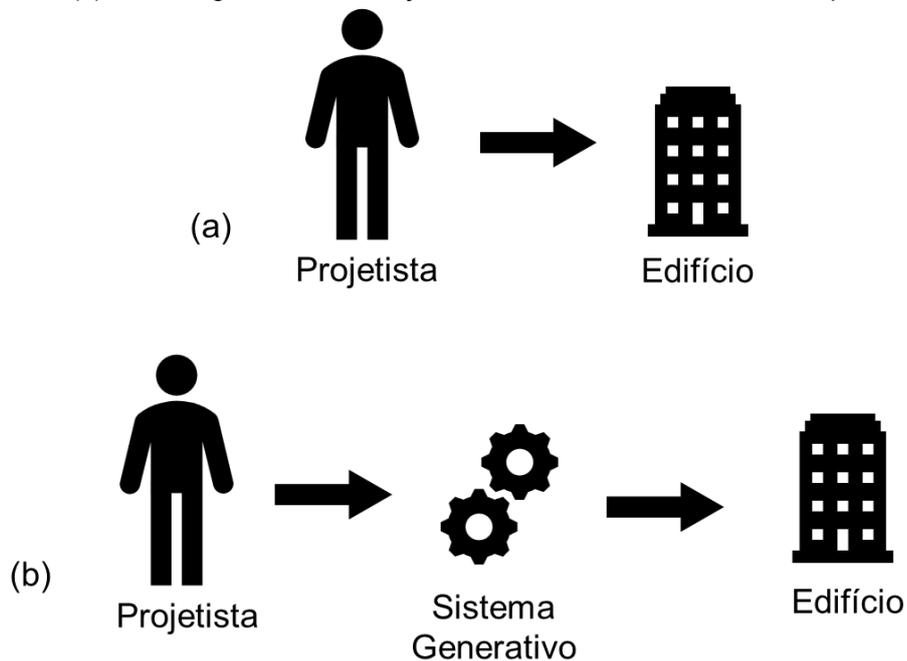
aplicação da modelagem paramétrica, no entanto, um ponto comum entre elas é a formulação de um sistema de geração de soluções.

2.2.2 O sistema generativo de projeto

Se a aplicação de procedimentos paramétricos emprega a interatividade de componentes a fim de identificar a melhor combinação entre parâmetros e regras para uma determinada intenção de projeto, o processo pode ser caracterizado como uma técnica de projeto generativo (MONIZZA; BENDETTI; MATT, 2018). No entanto, ainda no final do século XX, começaram a surgir uma série de definições do que seria o sistema generativo, como a de Soddu (1994) que o caracterizou como um processo morfogenético que utiliza algoritmos estruturados por meio de um código fonte. O termo também pode ser definido como um procedimento cíclico baseado em uma ideia abstrata de onde são aplicadas regras ou algoritmos. Embora alguns outros autores tenham tentado conceituar o sistema generativo, não há uma única definição para o termo, mas sim muitas que se complementam (AGKATHIDIS, 2015). O que se pode destacar é que esse processo tem como objetivo auxiliar na geração de novas ideias e soluções de projeto ampliando os recursos e possibilidades dos projetistas (SHEA; AISH; GOURTOVAIA, 2005).

As discussões sobre a sistematização e a inserção de tecnologias na prática projetual tem contribuído para a compreensão de possíveis aplicações do sistema generativo no projeto arquitetônico. Apesar de seu recente avanço, pesquisas referenciais, como é o caso dos sistemas generativos por meio de algoritmos evolucionários propostos por Frazer (2002), tem contribuído de forma direta para uma crescente difusão de metodologias que adotam a modelagem paramétrica tanto no meio acadêmico como nas aplicações profissionais. Wortmann e Tunçer (2017) se utilizaram de três estudos de caso para analisar os conceitos do projeto paramétrico na prática contemporânea de arquitetura. Diante desse contexto, é possível depreender que os projetistas começaram a assumir um papel de intermediador de processos, não atuando de forma direta no produto final como nos métodos tradicionais, mas no sistema que o gera (Figura 10), assim como já frisado por Fischer e Herr (2001).

Figura 10 – Papel do projetista na elaboração do projeto: (a) método tradicional, atuação de forma direta, (b) sistema generativo, atuação indireta como intermediador de processos.



Fonte: Adaptado de Fischer e Herr (2001).

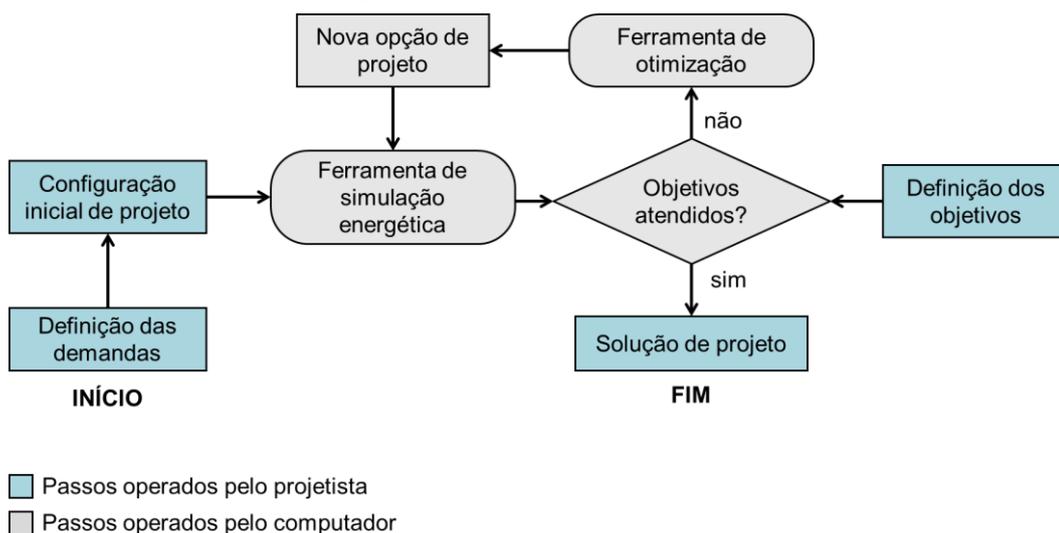
Deve-se, por fim, apontar a ênfase dada por Schumacher (2008) em seu “Manifesto Paramétrico” quanto a necessidade de adequação das disciplinas da arquitetura e engenharia aos processos de parametrização. O autor ainda ressalta que as tecnologias digitais não podem se expressar unicamente na automatização dos edifícios, mas precisam de assumir também um papel como núcleo do projeto arquitetônico, assim como é no caso dos sistemas generativos (SCHUMACHER, 2016). Essa abordagem permite que os projetistas assumam uma posição mais dinâmica, levando em consideração a possibilidade de sua aplicação em diversas temáticas para a geração otimizada de soluções (LOBACCARO *et al.*, 2018). Tendo isso em vista, Singh e Gu (2012) destacam que os principais incentivos para adoção de sistemas generativos na arquitetura são a sua capacidade de automatizar tarefas durante processo de projeto e explorar um amplo campo de soluções.

2.3 OTIMIZAÇÃO BASEADA EM SIMULAÇÃO

Os recentes progressos na ciência da computação e a exigência na elaboração de edifícios de alto desempenho tem proporcionado um ambiente favorável à aplicação de métodos de otimização no setor da construção civil (NGUYEN; REITER; RIGO,

2014). No âmbito do projeto performativo, destaca-se que esses métodos além de serem frequentemente implementados como auxílio de *softwares* de modelagem paramétrica, também estão associados a ferramentas de simulação de desempenho, como por exemplo, o EnergyPlus⁹. Desse modo, embora existam diferentes vertentes de pesquisa, é de comum acordo entre os especialistas na área de engenharia e arquitetura que a otimização se refere ao uso automatizado de recursos da otimização matemática – por meio de algoritmos – na busca por resultados “ótimos” dentro do campo de soluções delimitado pelo projetista (EVINS, 2013; KONIS; GAMAS; KENSEK, 2016; MACHAIRAS; TSANGRASSOULIS; AXARLI, 2014; ØSTERGÅRD; JENSEN; MAAGAARD, 2016; SHI *et al.*, 2016a; TIAN *et al.*, 2018). Na Figura 11 é ilustrado o fluxograma esquemático dos procedimentos executadas durante a elaboração de um projeto otimizado.

Figura 11 – Esquema geral de aplicação dos procedimentos de otimização.



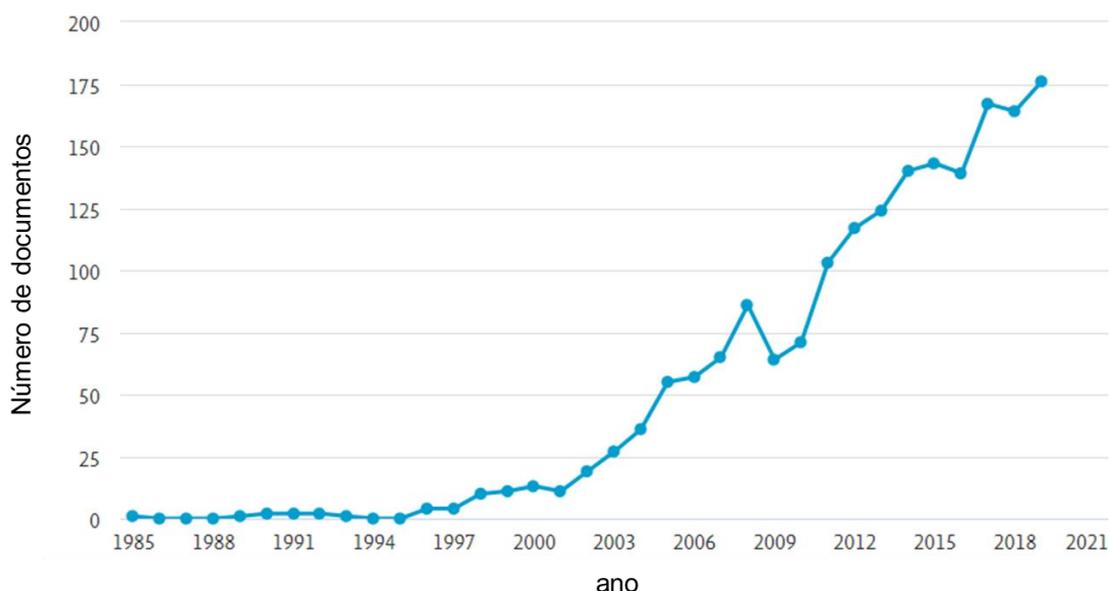
Fonte: adaptado de Shi e outros (2016b).

Na construção civil o processo de otimização, também conhecido como Otimização Baseada em Simulação (OBS), é requerido na resolução de objetivos conflitantes, como é o caso de estudos relacionados a iluminação natural e à eficiência energética, por exemplo. Apesar de ter ganho visibilidade nos últimos anos, o emprego dessa técnica tem sido considerado desde as décadas de 80 e 90 do século passado devido aos avanços científicos realizados no período entre guerras. Um dos pioneiros foi

⁹ O EnergyPlus é um dos softwares de simulação energética mais utilizados por arquitetos, engenheiros e pesquisadores: <https://energyplus.net/>.

Wright (1986) quando aplicou o método de busca direta na otimização de sistemas de Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado (AVAC). Desde então, a partir dos primeiros anos do século XXI, aumentou-se o interesse da comunidade científica na exploração do potencial de aplicação da otimização, bem como no desenvolvimento de ferramentas conforme ilustra a Figura 12.

Figura 12 - Evolução das publicações relacionadas a otimização na base de dados Scopus.



Fonte: adaptado de Scopus (2019).

Na última década diversas pesquisas foram realizadas no meio científico em busca de um aprofundamento do tema ou em abordagens específicas no campo da construção civil. Evins (2013), por exemplo, elaborou uma revisão de literatura acerca da aplicação dos métodos de otimização computacional no projeto de edifícios, com ênfase em residências e na prática de *retrofit*. Nguyen; Reiter e Rigo (2014) destacaram os métodos de otimização no projeto arquitetônico, com a discussão dos avanços e barreiras relacionados a temática. Machairas, Tsangrassoulis e Axarli (2014) estudaram os algoritmos de otimização e sua utilização no projeto arquitetônico. A eficiência energética associada a OBS foi analisada pelo ponto de vista dos arquitetos por Shi e outros (2016b). Já o processo de otimização e a sua aplicação nas envoltórias foi abordado por Huang e Niu (2016). Por outro lado, Tian (2013) investigou os métodos de análise de sensibilidade na eficiência energética assim como também a avaliação energética do edifício. Østergård, Jensen e Maagaard (2016) revisaram a literatura existente sobre as simulações computacionais

nos estágios iniciais de projeto. Kheiri (2018), por sua vez, explorou os métodos de otimização aplicados a eficiência energética na configuração da geometria e envoltória dos edifícios.

Diante desse contexto, cabe discorrer sobre os tipos de otimização mais usuais dentro da perspectiva da simulação desempenho no projeto digital. Segundo Wortmann e Nannicini (2017), costuma-se classificar os métodos OBS em três categorias, as quais: 1) metaheurística; 2) busca direta; 3) métodos baseados em modelos. No primeiro caso, os algoritmos se baseiam em analogias biológicas relacionadas a teoria da evolução de Charles Darwin, assim como na aleatorização dos parâmetros de projeto (EVINS, 2013; SUH; PARK, 2017; YANG *et al.*, 2014). Na busca direta os procedimentos são tipicamente determinísticos, ainda que existam variações estocásticas. Sendo assim, são realizadas comparações de cada teste com a solução anterior (EKICI *et al.*, 2019; KOLDA; LEWIS; TORCZON, 2003). Por fim, os métodos baseados em modelos se utilizam de uma abordagem indireta, construindo modelos substitutos que guiam a busca para um candidato com melhor desempenho (COSTA; NANNICINI, 2018). Embora existam particularidades, um ponto em comum entre todos esses tipos de otimização é que se baseiam em procedimentos denominados de “caixa preta”.

Essa terminologia – também denominada como livre de derivativos – caracteriza os procedimentos que tentam solucionar problemas de otimização em que a função objetivo é computável, mas não está disponível em formato analítico, ou seja, não são passíveis de verificação. Para deixar mais claro, na otimização, a função objetivo é definida como uma relação entre as variáveis de entrada de um modelo e as medidas de desempenho. Em outras palavras, a expressão matemática que exprime a função objetivo é desconhecida, pois se baseia em procedimentos internos das ferramentas de simulação (CONN; SCHEINBERG; VICENTE, 2009; HENDRIX; G.-TÓTH, 2010). Sendo assim, quando são realizadas simulações vinculadas a um modelo paramétrico, o candidato gerado pode ser modificado conforme o objetivo (medida de desempenho), de modo a minimizar ou maximizar os dados de saída, como por exemplo, percentual de iluminância em um ambiente ou a intensidade de uso de energia em um edifício (WORTMANN, 2018).

Tendo em vista a variedade de métodos de OBS, Nguyen, Reiter e Rigo (2014) propuseram a divisão do processo de otimização em três pequenas fases: 1) pré-processamento; 2) otimização; e 3) Pós-processamento. No primeiro momento são definidos os aspectos que compõem o problema, como por exemplo as variáveis (discretas¹⁰ ou contínuas¹¹), as restrições, o algoritmo e o programa de simulação. Já na segunda fase, são estabelecidos os critérios de término da otimização, assim como detecção de falhas no processo e o monitoramento de convergência¹². Por fim, no pós-processamento, os resultados são interpretados e apresentados. Sendo assim, segundo Wortmann (2018), a aplicação da OBS deve ser norteadas pelas intenções particulares de cada projeto a fim de alcançar uma melhor eficácia dos seus procedimentos e garantir a confiabilidade dos resultados.

2.3.1 Algoritmos e ferramentas

Uma das principais tarefas no processo de otimização é a definição do tipo de problema a ser avaliado. Nesses casos, existem duas possibilidades: na primeira ele pode ser caracterizado como de objetivo único quando considera apenas um aspecto em sua avaliação, como por exemplo o consumo final de energia em um ambiente; por outro lado, na segunda, são considerados mais de um objetivo – os quais frequentemente são conflitantes – como o conforto térmico e consumo de energia elétrica dos sistemas de ar condicionado. Essa abordagem pode ser classificada como multiobjetivo. No entanto, apesar desta considerar uma concepção mais próxima da realidade projetual, cerca de 60% dos estudos sobre a otimização nos edifícios utilizam a abordagem de objetivo único (NGUYEN; REITER; RIGO, 2014; ØSTERGÅRD; JENSEN; MAAGAARD, 2016). Isso se deve ao fato de exigirem um menor custo computacional e, conseqüentemente, um menor tempo de execução. Além disso, em alguns casos, pode se relacionar mais de um objetivo por meio de formulações matemáticas e um sistema de pesos.

¹⁰ As variáveis discretas são um conjunto de resultados possíveis de um fenômeno que pertencem a ordem dos números naturais (0, 1, 2, 3..., n). Por exemplo: quantidade de janelas de um edifício, número de pavimentos, etc.

¹¹ As variáveis contínuas são um conjunto infinito de valores entre dois valores quaisquer. Ou seja, pertencem ao conjunto dos números irracionais. Por exemplo: dimensão de uma abertura, peso de um material, etc.

¹² Tem como objetivo verificar a evolução do algoritmo para alcançar a solução ótima.

Devido a esses aspectos serão apresentados nesta dissertação apenas ferramentas e algoritmos de objetivo único. Tendo isso em vista, e levando em consideração que o *Grasshopper* é o editor de algoritmos mais utilizado em modelagens paramétricas no estágio inicial de projeto (KHEIRI, 2018), serão descritos brevemente as ferramentas de otimização que atuam dentro de sua interface de desenvolvimento (Quadro 1). Uma das mais populares é o Galapagos, que além possuir dois tipos de algoritmo – *Genetic Algorithm* (GA) e *Simulated Annealing* (SA) – é uma aplicação nativa do *Grasshopper*. Diversas pesquisas como as de Rutten (2013), Ercan e Elias-Ozkan (2015), Caldas e Santos (2016), Cartana e Pereira (2016), assim como outras o utilizaram para a resolução de problemas. A ferramenta se insere na categoria relacionada a metaheurística, a qual se baseia na teoria da evolução proposta por Charles Darwin (EVINS, 2013). Uma de suas características fundamentais é a geração de um conjunto significativo de pontos para cada iteração, de modo a assumir características estocásticas, ou seja, empregam ou até adotam a aleatoriedade na busca por soluções (RUTTEN, 2013). Destacam-se como principais vantagens a sua simplicidade conceitual e a facilidade de implementação. Por outro lado, a maior desvantagem é a necessidade de grande quantidade de simulações para sua validação, levando assim um longo tempo para o processamento dos dados.

Quadro 1 - Ferramentas de otimização com abordagem de objetivo único que possuem interface com o *Grasshopper*.

Ferramenta	Algoritmos	Referências
 Galapagos	<i>Genetic Algorithm (GA) e Simulated Annealing (SA)</i>	(GOLDBERG; HOLLAND, 1988; KIRKPATRICK; GELATT; VECCHI, 1983; RUTTEN, 2013; CALDAS; SANTOS, 2016)
 Goat	<i>Optimization by linear approximation (COBYLA), Bound Optimization by Quadratic Approximation (BOBYQA), subplex algorithm (Sbplx), dividing rectangle algorithm (DIRECT)</i>	(SIMON, 2019; NLOPT, 2019; WAIBEL et al., 2019)
 Silvereye	<i>Particle Swarm Optimization (PSO)</i>	(CICHOCKA et al., 2017; ILUNGA; LEITÃO, 2018)
 Opossum	<i>Radial Basis Function Optimization (RBFOpt), Radial Basis Function Multiobjective Optimization (RBFMOpt), Covariance Matrix Adaptation Evolution Strategy (CMA-ES) Non Sorted Generated Algorithm (NSGA-II)</i>	(WORTMANN; NIANCINI, 2016; WORTMANN, 2017; WORTMANN, 2018; COSTA; NIANCINI, 2018; WAIBEL et al., 2019)
 Dodo	<i>Non-linear gradient free optimization (NLOpt), Stochastic gradient descent algorithm, swarm optimization</i>	(GRECO, 2019; NLOPT, 2019)
 Nelder-Mead Optimization	<i>Nelder-Mead Method</i>	(LAGARIAS et al., 1998; ERKSLEY..., 2019)
 Optimus	<i>Self-Adaptive Differential Evolution with Ensemble of Mutation Strategies (jEDE)</i>	(ÇUBUKÇUGLU et al., 2019)

Fonte: elaborado pelo autor (2019).

Algumas ferramentas como Goat, Silvereye, Dodo e Nelder-Mead Optimization são raramente aplicadas em pesquisas científicas pois em geral não apresentam um bom desempenho durante o processo de otimização. Em contraponto, tanto o Optimus (CUBUKCUOGLU *et al.*, 2019) como o Opossum (WORTMANN, 2018) possuem níveis de excelência na busca por soluções de projeto. Ambos foram recentemente desenvolvidos por laboratórios de pesquisa em arquitetura para aplicações diretas no campo da construção civil. Em uma pesquisa realizada por Attia e outros (2013), elaborou-se um levantamento com projetistas que utilizavam procedimentos de OBS na prática projetual. Segundo a maioria dos entrevistados foi constatada a necessidade do desenvolvimento de algoritmos que não comprometem a eficiência no tempo de execução do projeto caso estejam associados a simulações de desempenho. Do mesmo modo, Tian e outros (2018) reforçaram a importância da temática e a sua aplicação no projeto arquitetônico. Diante desse contexto é cada vez mais pertinente a exploração de novos procedimentos e metodologias que se ajustem a realidade dos projetistas.

Os métodos baseados em modelos globais, por exemplo, têm despertado o interesse de pesquisadores nas últimas décadas, pois eles são capazes de otimizar de forma mais rápida e eficiente problemas de engenharia e arquitetura que, frequentemente, necessitam de muito tempo para simulação. Nesses casos os algoritmos aproximam o objetivo desconhecido com um modelo substituto obtido por meio de técnicas estatísticas (por exemplo a regressão polinomial) relacionadas à aprendizagem por máquina (*Radial Basis Functions*, conhecidas como RBFs, Redes Neurais, etc.), de modo a refinar as informações obtidas por meio da simulação (WORTMANN, 2018). A biblioteca RBFOpt utilizada pelo *Opossum* é um exemplo de aplicação desses procedimentos. Historicamente, um dos primeiros algoritmos baseados em modelos globais, destacado ainda no século passado por Jones; Schonlau e Welch (1998) é o *Efficient Global Optimization* (EGO), que faz uma combinação linear de funções gaussianas com pontos e valores objetivos de função conhecidos, de modo a selecionar o próximo ponto e maximizar a melhoria esperada do objetivo. Na prática, estudos experimentais indicam que outros tipos de modelos geralmente produzem melhores resultados (HOLMSTRÖM, 2008) como, por exemplo, o RBF (GUTMANN, 2001) ou modelos de conjunto (MÜLLER; SHOEMAKER, 2014).

Apesar de todos os aspectos levantados, deve-se ter em mente que o processo de otimização é apenas um instrumento para direcionar as alternativas de projeto dentro do campo de soluções, delimitado tanto pelo objetivo como pelas variáveis adotadas no projeto. Tendo isso em vista, não se subjugam a atividade criativa do projetista para se chegar a uma boa solução para um edifício, mas se usa as tecnologias digitais em favor desse processo de criação. Portanto, o que deve ficar claro é que a OBS oferece uma alternativa de complemento para o pensamento humano por meio de procedimentos matemáticos, estáticos e de aprendizagem por máquina.

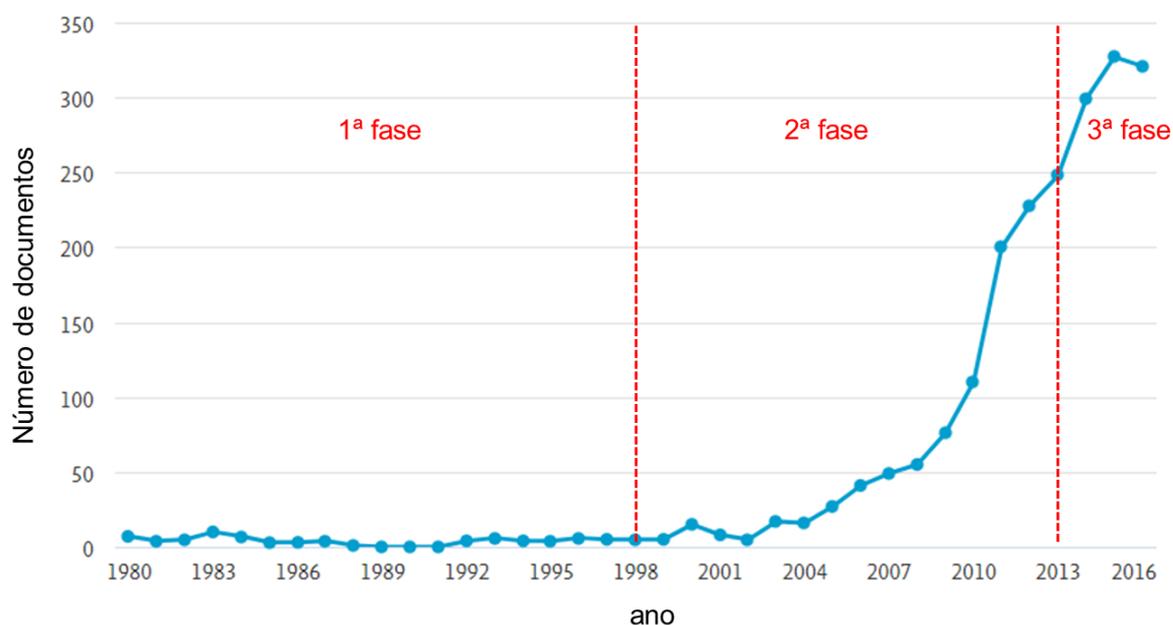
2.4 DESEMPENHO ENERGÉTICO DAS EDIFICAÇÕES

Desde a crise do petróleo, ocorrida em 1970, a eficiência energética tem sido um fator preponderante para a redução do consumo de energia em todo o mundo (COPIELLO, 2017). No entanto, a expansão dos centros urbanos e a crescente demanda por novas edificações tem colocado o setor da construção civil nas últimas décadas como o maior consumidor de energia elétrica a nível mundial. Sua representatividade beira

cerca de 31% do total dos gastos com uma taxa de crescimento de 0,9% ao ano no cenário projetado para 2040 (INTERNATIONAL..., 2019). A vista disso, pode-se inferir que uma melhoria qualitativa na eficiência das edificações é um dos meios mais eficazes para a redução do consumo de energia elétrica, tanto a nível nacional como internacional (ZHANG *et al.*, 2018). O que se tem notado é que, apesar do amplo desenvolvimento tecnológico, uma pequena parcela dos edifícios tem aderido ao uso de estratégias e dispositivos que proporcionem um melhor desempenho energético.

Para conhecer de fato os impactos e propor possíveis alternativas ao problema da eficiência energética, o meio científico tem se dedicado à pesquisa e à busca de soluções inovadoras. De acordo com Cristino, Neto e Costa (2018), o gradativo interesse no assunto pode ser notado pelo aumento de publicações relacionadas ao período de 1980-2016, o qual se caracteriza em 3 fases de crescimento. A primeira, de 1980-1998, com a presença de poucos pesquisadores e a carência de estudos, com aproximadamente 4% do total das publicações. A segunda fase (1998-2013), com um crescimento exponencial das pesquisas. E por fim, a terceira fase (2013-2016), com uma linearidade de publicações e um corpo científico com produção consolidada, conforme ilustra a Figura 13. Nesse sentido, tem sido visível o esforço dos pesquisadores em melhorar a eficiência energética das edificações, principalmente no que diz respeito ao desenvolvimento de técnicas de previsão, como as simulações computacionais, por exemplo (MAO; PAN; FU, 2016).

Figura 13 - Evolução das publicações relacionadas a eficiência energética. Dado obtido da base de dados referenciais Scopus a partir dos termos ("building energy performance" OR "building energy efficiency") para os anos de 1980 a 2016.



Fonte: adaptado de Scopus (2019).

Um dos principais objetivos na análise de desempenho dos edifícios, ainda no processo criativo, é a possibilidade de se comparar e identificar aspectos que possam proporcionar a melhoria do projeto (BAKAR *et al.*, 2015). Por exemplo, Liu e outros (2017) identificaram que alteração das configurações geométricas como altura, dimensão dos pavimentos tipo e fator de forma influenciaram positivamente no desempenho energético e luminoso em edifícios de escritório. Por outro lado, Delgarm e outros (2018) foram capazes de apontar, por meio de métodos de análise de sensibilidade, aspectos da composição do edifício, se ajustados corretamente, como o tamanho vidro, absorvância e condutividade dos materiais da parede são capazes de atenuar o consumo de energia elétrica. Há, desse modo, uma diversidade de métodos que são capazes de auxiliar o projetista no processo de tomada de decisão, ainda que existam lacunas entre os modelos simulados e o desempenho real das edificações (ZOU; WAGLE; ALAM, 2019). Entretanto, apesar do desenvolvimento e a disseminação de ferramentas previsão, parece que aspectos básicos de projeto, como a análise de materiais, verificação da orientação solar dentre outras características tem sido esquecidas ou rejeitadas pelos arquitetos.

O panorama dos grandes centros urbanos, principalmente no caso dos edifícios de escritório, é a realidade de uma mesma conjuntura: o privilégio estético de um “estilo internacional” em contraposição a realidade do local onde está inserido (NEVES; MARQUES, 2017). Ainda nos primeiros anos do século XXI, Lamberts, Ghisi e Ramos (2006) verificaram características comuns entre os edifícios de escritórios no Brasil, como a tipologia e a composição dos materiais. De acordo com os autores, após um conjunto de análises, conclui-se que a maior parcela dos edifícios possui um baixo desempenho térmico e energético, como o esperado. Embora muitos edifícios brasileiros estejam na contramão da eficiência energética, pode-se dizer que essa é uma realidade presente unicamente em países de economia emergente, mas também em alguns países desenvolvidos, como é o caso do Canadá onde prédios comerciais e institucionais representam 12% do uso total de energia (RUPARATHNA; HEWAGE; SADIQ, 2016). Tendo isso em vista, tem sido cada vez mais perceptível a necessidade de aplicação de procedimentos que auxiliem o desempenho energético dos edifícios.

2.4.1 Avaliação e classificação do desempenho energético

A fim de obter êxito na implementação de práticas de eficiência energética nas edificações, tem se tornado comum em diversos países a adoção de sistemas de classificação de consumo de energia e etiquetagem, obrigatórios ou voluntários (WONG; KRÜGER, 2017). Essa prática já se tornou comum para os eletrodomésticos, sendo implementada em mais de 50 países. Uma das principais vantagens é a classificação dos aparelhos, essencial na tomada de decisão dos consumidores na aquisição de tais produtos. Na Europa, o processo para a classificação do desempenho energético das edificações se iniciou com a Diretiva 93/76/ECC, a qual tinha o objetivo de limitar as emissões de dióxido de carbono (EUROPEAN COUNCIL, 1993; PÉREZ-LOMBARD *et al.*, 2009). A Dinamarca, por sua vez, se tornou uma referência por ser o primeiro país a implementar as políticas de classificação do desempenho energético das edificações, em 1997 (JENSEN; HANSEN; KRAGH, 2016). Em 2010, com a reformulação da Diretiva 2010/31/EU (EUROPEAN COUNCIL, 2010), se tornou obrigatório na União Europeia tanto o certificado de desempenho energético em edifícios em reforma e conclusão, como também fossem incluídas as

classificações em anúncios para venda e aluguel (EUROPEAN COMMISSION, 2013; FUERST; MCALLISTER, 2011).

Apesar do exemplo animador, a realidade das certificações na maioria dos países em emergência ainda está distante. No Brasil, somente a partir de 2001 com a chamada “Crise do Apagão”, que ocasionou a interrupção no fornecimento de energia elétrica devido à falta de investimentos e longos períodos de seca (JARDINI *et al.*, 2002), que se observou alguns avanços quanto às políticas de eficiência energética. Dentre algumas iniciativas, pode-se destacar a criação da Lei nº 10.295 (BRASIL, 2001b) a qual foi publicada sob o decreto nº 4.059 (BRASIL, 2001a) que permitiu a publicação do Plano Nacional de Energia (BRASIL, 2007) e o Plano Nacional de Eficiência Energética (BRASIL, 2011). Em 2003 foi lançado pelo governo brasileiro o PROCEL Edifica por meio do Plano de Ação para Eficiência Energética em Edifícios para reduzir o consumo de eletricidade no setor da construção civil (WONG; KRÜGER, 2017).

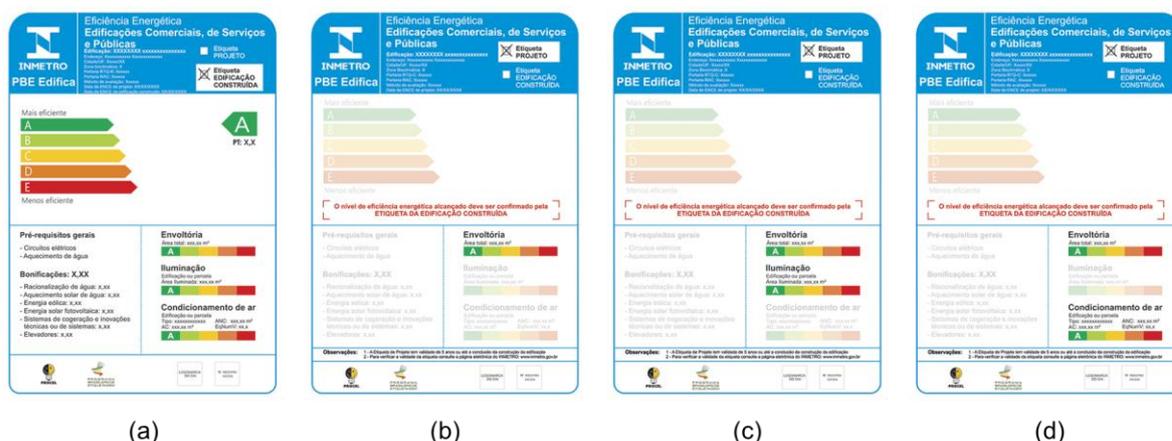
Os pesquisadores da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) foram um dos pioneiros no desenvolvimento de uma base técnica para o sistema de rotulagem de eficiência energética nacional desde 2004 (CARLO; LAMBERTS, 2008; LAMBERTS *et al.*, 2007). Em fevereiro de 2009 foi lançado o Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas (RTQ-C) e seus documentos complementares (BRASIL, 2018). A precisão do método de avaliação foi rigorosamente testada nos últimos anos com a participação de distintos pesquisadores com a validação de modelos pelas normas do BESTEST (MELO *et al.*, 2012), pelo EnergyPlus e DAYSIM (OLIVEIRA FERNANDES; LABAKI, 2012; RACKES; MELO; LAMBERTS, 2016) e ANSI/ASHRAE 90.1 (MELO; SORGATO; LAMBERTS, 2014).

Devido ao seu aprimoramento recente, o RTQ-C passou por uma série de revisões, tanto em relação aos procedimentos do método como na redação do próprio regulamento. As alterações foram requeridas nos anos de 2010, 2012, 2013 e 2014, sendo que a última, realizada em 2018, passou por uma avaliação de consulta pública (PROGRAMA..., 2019). Embora o texto final ainda esteja sendo redigido, há uma versão provisória disponível na Plataforma do Instituto Nacional de Metrologia

(INMETRO)¹³. Uma das distinções mais claras no novo regulamento é a adoção de um novo zoneamento bioclimático brasileiro, caracterizado como grupos climáticos, passando de 8 para 24 categorias. A temática foi amplamente discutida em pesquisas como a de Roriz (2014); Walsh, Cóstola e Labaki (2017a, b, 2018, 2019). Devido a todas essas revisões o objetivo do documento é possuir procedimentos mais precisos e de fácil implementação.

Assim sendo, são adotados dois métodos para a avaliação dos edifícios: 1) prescrição; e 2) simulação. Ambos se baseiam na análise de três sistemas distintos (envoltória, iluminação e condicionamento de ar), os quais podem ser classificados tanto individualmente como simultaneamente. O nível de eficiência, por sua vez, se baseia em uma graduação que vai de A (mais eficiente) a E (menos eficiente). Desse modo, após a avaliação e a obtenção da pontuação final, o edifício recebe a Etiqueta Nacional de Conservação de Energia (ENCE) emitida pelo Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO), conforme Figura 14, que pode ser aplicada tanto para a fase de projeto como para o edifício existente (BRASIL, 2018).

Figura 14 - ENCE para edificações comerciais, de serviço ou públicas. (a) ENCE geral; (b) ENCE parcial da envoltória; (c) ENCE parcial da envoltória e do sistema de iluminação; (d) ENCE parcial da envoltória e do sistema de condicionamento de ar.



Fonte: adaptado de (PROGRAMA..., 2019).

Embora se tenha tido avanços em relação à eficiência energética das edificações comerciais com o desenvolvimento do RTQ-C, assim como também com a implementação das normas de desempenho (ASSOCIAÇÃO..., 2013) e o RTQ-R para edifícios residenciais, nos últimos anos, a situação do Brasil ainda tem permanecido

¹³ <http://www.inmetro.gov.br/legislacao/rtac/pdf/RTAC002520.pdf>

preocupante. Mais de 40% da energia elétrica é consumida pelas edificações, públicas, comerciais e residenciais (BRASIL, 2019). O reflexo na carência da aplicação de conceitos de eficiência energética pode ser visto no caráter voluntário na aplicação dos regulamentos, com exceção dos edifícios institucionais, os quais devem respeitar o RTQ-C tanto nos novos projetos como em reformas (BRASIL, 2014). Outro fator que reforça essa perspectiva é fato de somente 234 edifícios comerciais¹⁴, de serviços e públicos possuírem a ENCE (INSTITUTO..., 2019).

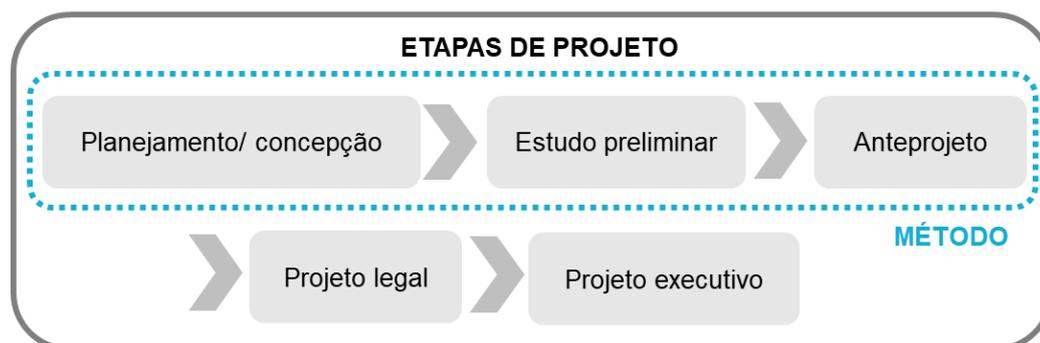
Sendo assim, o sucesso das certificações energéticas depende da capacidade de desenvolver procedimentos confiáveis, de simples aplicação e com baixo custo (WONG; KRÜGER, 2017). Segundo Li e outros (2019) um dos aspectos mais importantes é fazer com que se aumente o acesso à informação e, por consequência, a conscientização sobre a eficiência energética. Entretanto, é necessário também que o governo desenvolva políticas que atuem como instrumentos e incentivos tanto para os projetistas como para seus respectivos clientes (SHEN *et al.*, 2016). Portanto, ainda que o cenário atual esteja passando por processos de adaptação, tem sido cada vez mais imprescindível uma mudança nos métodos de projeto, com a implementação de estratégias que possibilitem a previsão do desempenho dos edifícios assim como a exploração de tecnologias que auxiliem na incorporação da eficiência energética no setor da construção civil.

¹⁴ Os dados utilizados são da última atualização do documento, referente ao dia 09 de setembro de 2019.

3 METODOLOGIA

Para atender aos objetivos e à hipótese levantada na pesquisa, foram estruturados uma série de processos para proposição de um método de projeto performativo tendo em vista a sua aplicação na fase inicial do projeto arquitetônico, uma vez que nesta etapa está concentrado um importante conjunto de decisões construtivas que impactam diretamente o desempenho energético da edificação (Figura 15). Vale destacar que os procedimentos elaborados não visam suprimir nem mesmo limitar a autonomia do projetista, mas sim oferecer ferramentas e alternativas para auxiliar o desenvolvimento e a tomada de decisões no processo de projeto. Nesse sentido, o intuito foi proporcionar um cruzamento sistêmico de informações entre a modelagem paramétrica, critérios de desempenho energético e algoritmos de otimização para a geração de diferentes propostas de um modelo de edifício.

Figura 15 - Etapas do desenvolvimento do projeto arquitetônico que abrangem o método de projeto proposto.



Obs.: o método adota características destas etapas de projeto, no entanto, não tem como objetivo abordar a produção de desenhos técnicos.

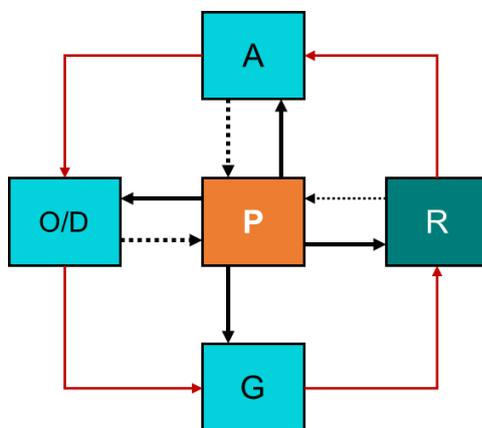
Fonte: elaborado pelo autor (2019).

Haja vista o conjunto de informações disponíveis na literatura científica sobre projeto performativo (KALAY, 1999; KOLAREVIC, 2004; OXMAN, 2006; 2008, 2009; KOLAREVIC; MALKAWI, 2005; ANDRADE, 2012) como visto anteriormente no capítulo referente à revisão bibliográfica, notam-se dois aspectos relevantes: 1) existe uma definição e conceituação dos elementos que caracterizam o processo de projeto performativo; 2) há a possibilidade da proposição de diferentes métodos de projeto, uma vez que sigam a mesma estrutura conceitual. Considerando esses fatores, foi desenvolvido um processo de trabalho fundamentado em características pertinentes

à pesquisa exploratória e experimental conforme a classificação realizada por Gil (2008). Nesse sentido, investigou-se primeiramente os elementos e etapas essenciais ao método de projeto performativo, sendo executados posteriormente um conjunto de experimentos para a validação da proposta metodológica.

Assim sendo, foram adotadas as configurações do modelo de projeto digital proposto por Oxman (2006), com as sequências de decisões (geração, representação, otimização/desempenho e avaliação) realizadas durante o estudo. Em paralelo, foi considerado o modelo composto do método de projeto performativo (Figura 16) como configuração final tendo em vista seu alto nível de automatização, conforme destacado por Andrade (2012). O mesmo se adequou a sucessão de tomada de decisões pertinente a cada etapa do teste. Desse modo, o método proposto neste trabalho se apoiou na execução de um projeto hipotético voltado à realidade local da cidade de Vitória. Portanto, os critérios utilizados remetem a algumas especificidades, tais como o grupo climático onde se insere ou até mesmo os índices de controle urbano presente no município.

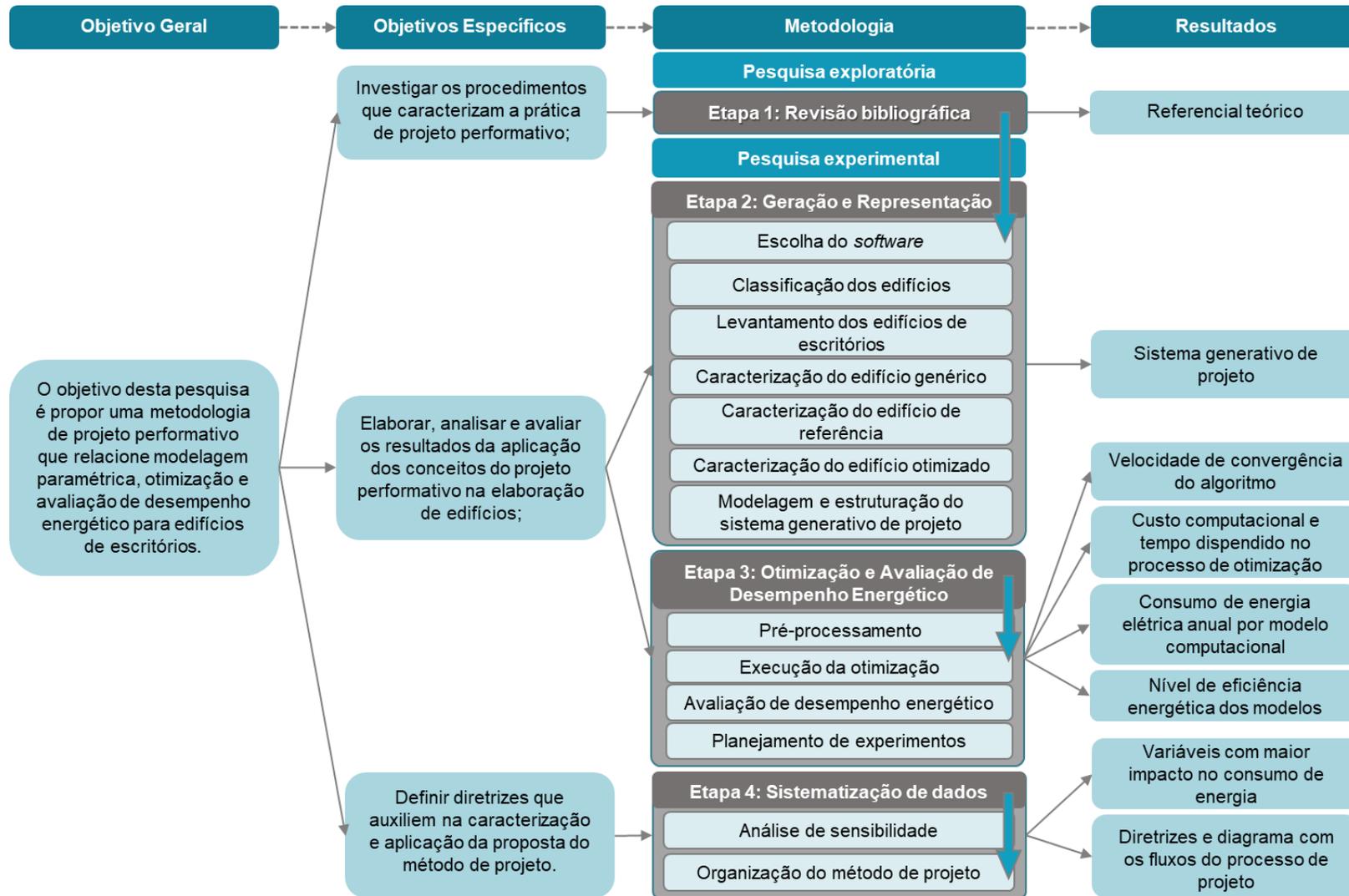
Figura 16 - Modelo simbólico de projeto performativo adotado na pesquisa.



Fonte: adaptado de Andrade (2012).

Para ilustrar de forma mais clara a categorização das 5 etapas percorridas e a interrelação entre as atividades desenvolvidas durante a pesquisa, elaborou-se um fluxograma mostrado na Figura 17. Salienta-se que devido à necessidade de apresentação de conceitos e termos específicos (e fundamentais) para a compreensão da metodologia, a etapa da revisão bibliográfica foi apresentada anteriormente, tendo, no entanto, a descrição dos seus procedimentos no tópico subsequente

Figura 17 - Mapa conceitual da pesquisa.

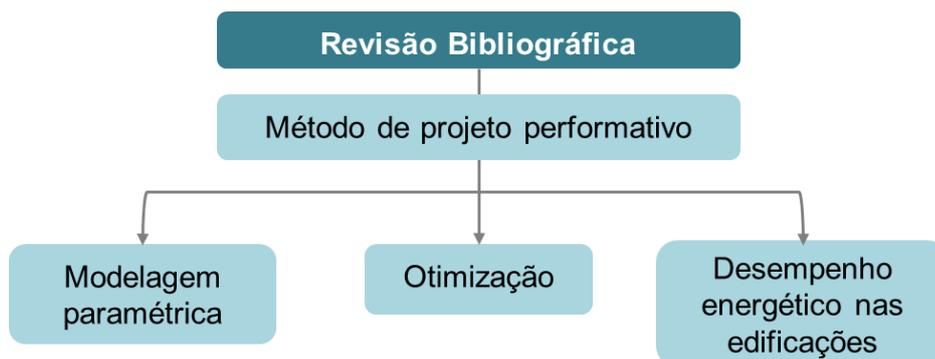


Fonte: elaborado pelo autor (2019).

3.1 ETAPA 1: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Objetivando delimitar o recorte do objeto de estudo, foram previamente definidos os aspectos fundamentais que possibilitassem o embasamento necessário para a pesquisa, de acordo com o ilustrado na Figura 18.

Figura 18 - Eixos temáticos da revisão bibliográfica.



Fonte: elaborado pelo autor (2019).

A fim de estabelecer critérios bem definidos para busca e seleção da literatura científica, foi elaborado o Quadro 2 que descreve em detalhes o método de pesquisa. É importante destacar que os descritores, ou seja, as palavras-chave, foram utilizadas em inglês, pois uma parcela considerável do conteúdo científico mundial é produzida neste idioma. Para simplificar a organização dos dados e evitar a duplicação das sintaxes (organização lógica dos descritores), foram criados códigos que correlacionam as temáticas, por exemplo: “EP-1-12”. O termo “estratégia de pesquisa” é utilizado por meio da abreviação “EP”, e os algarismos subsequentes significam tanto o número da sintaxe como a combinação entre temáticas.

Quadro 2 - Estratégia de pesquisa.

Problema / Tema	Descritores (palavras-chave)
1. Método de projeto performativo	performative design / performance-based design
2. Modelagem paramétrica	parametric modeling / parametric design / generative system
3. Otimização	optimization / simulation-based optimization / building performance optimization
4. Desempenho energético nas edificações	building energy performance / energy efficiency / building energy efficiency
Código	Sintaxe (estratégias de busca)
EP-1-14	("performative design" OR "performance-based design") building AND "energy efficiency"
EP-2-2	building ("parametric modeling" OR "parametric design")
EP-2-2	"parametric design" AND "generative system"
EP-3-23	("parametric design" AND "building performance optimization" OR "simulation based optimization")
EP-3-3	("simulation-based optimization" OR "building performance optimization" OR "building energy simulation and optimization")
EP-4-3	building AND "energy efficiency" AND ("simulation based optimization" OR "building performance optimization")
EP-4-4	("building energy performance" OR "building energy efficiency")
EP-5-4	("building energy performance" OR "building energy efficiency") AND ("office buildings" OR "commercial buildings")
EP-6-24	("parametric modeling" AND "building energy performance")
EP-7-12	("performative design" AND "parametric modeling")
Locais de pesquisa	Scopus, Science Direct e Google Scholar
Termos da sintaxe contidos em	Título, resumo e palavras-chave
Recorte temporal	2015-2019
Tipo de documento	Crítérios de seleção
Artigo de pesquisa e revisão publicados em periódico, artigos no prelo e artigos publicados em anais de evento	Mais citados/ relevantes, e publicados recentemente
Documentos, normas, regulamentos e relatórios	Sites governamentais, centros de pesquisa ou institutos/associações especializados no tema
Livros e teses	Importante para a temática ou publicado recentemente
* A literatura científica e documentos relacionados a períodos anteriores são aceitos em casos específicos, como: explicação de conceitos/termos ou conteúdo referencial indispensável para a compreensão da temática	

Fonte: elaborado pelo autor (2019).

Os locais de pesquisa para o refinamento do conteúdo foram selecionados pelos seguintes critérios: 1) remeter às fontes primárias da produção científica, como é o

caso da *Scopus* (bases de dados referenciais); 2) ser relevante na área de estudo de engenharia civil e arquitetura, no caso do *Science Direct* (base de dados de textos completos); 3) permitir a localização de conteúdos acadêmicos como teses de doutorado, proporcionado pelo Google Scholar (ferramenta de busca). Para documentos como normas, regulamentos e relatórios a pesquisa foi realizada em sites governamentais, centros de pesquisa e institutos/associações relacionados ao tema, como destacado anteriormente no Quadro 2.

3.2 ETAPA 2: GERAÇÃO E REPRESENTAÇÃO

Para a elaboração da fase inicial dos procedimentos experimentais, adotou-se como ponto de partida os processos de geração e representação do edifício. Sendo assim, neste primeiro momento, foram estabelecidas as interações de forma explícitas entre o projetista e o modelo digital por meio do código do sistema generativo de projeto, onde se determinou as relações paramétricas entre os diversos elementos da edificação. Esses aspectos foram fundamentais, pois deram o aporte necessário para o desenvolvimento das fases posteriores.

Desta forma, a fim de que os experimentos elaborados durante o processo de projeto possam ser compreensíveis, a sequência de tomada de decisões foi descrita e justificada nos tópicos seguintes, com o propósito de demonstrar não somente a forma de levantamento/ elaboração dos modelagem computacional de projeto, mas também a escolha do *software* e as interrelações criadas entre as variáveis durante a geração do sistema generativo de projeto.

3.2.1 Escolha do software

A escolha do *software* é um dos pontos fundamentais antes do desenvolvimento do projeto, uma vez que define as potencialidades e limitações da manipulação digital da forma e das informações relacionadas a ela, tendo em vista os objetivos pretendidos pelo projetista. Em consonância a esses aspectos, balizando-se no enfoque direcionado ao projeto performativo, foi definido o uso do *software Rhinoceros* (Rhino) versão 6 para esta pesquisa. A escolha, por sua vez, se justifica tanto pelo seu uso frequente em projetos performativos (ANDRADE, 2012), quanto no que diz respeito à

aplicação dos processos de otimização na etapa inicial de projeto, de acordo com Kheiri (2018). A interoperabilidade, o agrupamento de ferramentas, bem como sua capacidade de criar modelagens algorítmicas e paramétricas são algumas de suas principais características.

Pode-se dizer que a maioria desses aspectos se deve as peculiaridades de seu editor gráfico de algoritmos chamado de *Grasshopper*. Nele, é possível desenvolver *scripts*¹⁵ de programação em VPL o que torna sua interface mais amigável para arquitetos e engenheiros, uma vez que essa linguagem é mais intuitiva em comparação as elaboradas na forma escrita. Entretanto, em sua plataforma de desenvolvimento existe também a possibilidade de incrementar dados em linguagens como *Python* e *Java*. Isso flexibiliza seu uso, além de ampliar a possibilidade de criação e interação entre diversas aplicações.

Por outro lado, apesar do *Rhinoceros* não ser disponibilizado de forma gratuita, ele dispõe em sua plataforma uma versão educacional com um preço acessível a estudantes. Tendo isso em vista, e a necessidade do desdobramento dos estudos, o Laboratório de Planejamento e Projetos (LPP) adquiriu uma licença¹⁶, a qual foi utilizada no decorrer da dissertação. Apesar deste contraponto financeiro, a Mcneel (empresa desenvolvedora do *Rhino*), oferece em uma plataforma *online*¹⁷ uma gama de *plugins* gratuitos que auxiliam e incrementam o campo de ação do *software* como por exemplo, o *Honeybee*, utilizado para as simulações energéticas durante os experimentos desta pesquisa. Além de ser gratuita, a ferramenta é uma das mais utilizadas pelos usuários do *Grasshopper*, sendo reconhecida também pelo *Building Energy Software Tools* (BEST) do Departamento de energia dos Estados Unidos (BUILDING..., 2019). Ela se estrutura a partir de motores de simulação validados como *Radiance*, *Energy Plus* e *Therm* (LADYBUG..., 2019), os quais possuem características adequadas aos pré-requisitos para simulação de algumas normas e regulamentos como por exemplo o RTQ-C (BRASIL, 2018).

¹⁵ Pode ser traduzido como o código de programação.

¹⁶ Licença com número de série 6-1600-0103-1-23945-35371.

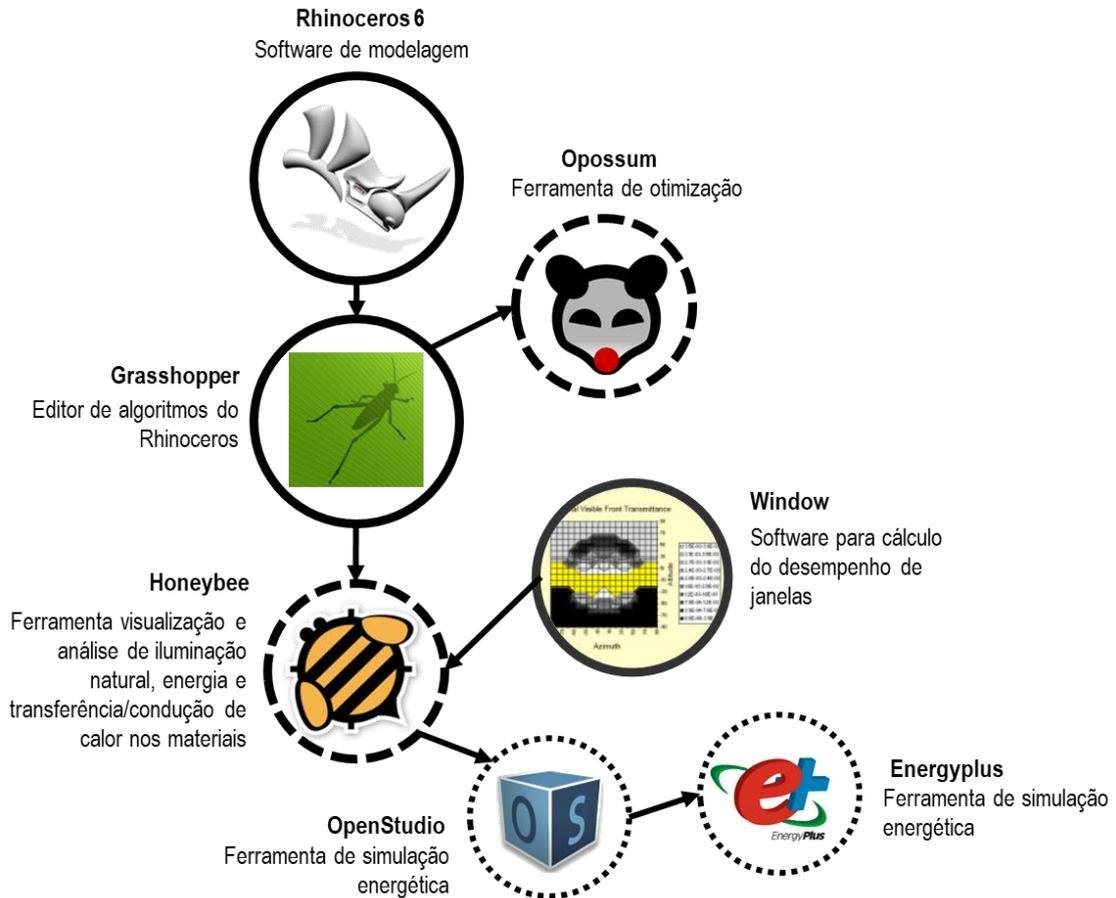
¹⁷ Site com plugins oferecidos pela Mcneel: <<https://www.food4rhino.com/>>.

Já em relação à ferramenta de otimização, optou-se pela utilização do *Opossum*, primeiro *plugin* de otimização baseada em modelos substitutos¹⁸ para o *Grasshopper*, desenvolvido e disponibilizado gratuitamente pelo pesquisador Thomas Wortmann do *Advanced Architectural Lab* da *Singapore University of Technology and Design* (ADVANCED..., 2018). Ele é baseado em RBFOpt, que é uma biblioteca com algoritmos em *Python*, o qual utiliza técnicas matemáticas para otimização de caixa preta (GITHUB, 2018), já mencionada anteriormente na revisão bibliográfica. O seu algoritmo foi testado e comparado com outros como GA, SA, PSO, HypE e DIRECT, tendo em vista problemas de simulação energética e de iluminação. Os resultados dos *benchmarks* de monitoramento de convergência mostraram um bom desempenho para esse tipo de problema, oferecendo um menor custo computacional que os populares algoritmos genéticos (WAIBEL *et al.*, 2019; WORTMANN, 2017, 2018). Apesar de recente, a ferramenta foi ganhadora de três prêmios: o *Good Design Award: Nominee* (GOOD..., 2018); o *SG Mark Award* (SINGAPORE..., 2018); e o COIN-OR (COMPUTATIONAL..., 2018).

Diante da necessidade do cálculo das características térmicas para a proposição dos materiais de composição das janelas no processo de otimização, foi utilizado o *software Window 7.7* da *Lawrence Berkley National Laboratory* (LBNL). Além de possuir uma ampla gama de vidros em seu catálogo de opções, possibilita também obter os dados de maneira simples e rápida. Devido a esses fatores, ele acelera o processo e permite uma configuração mais eficaz dos modelos computacionais. Os *softwares* e o conjunto de ferramentas utilizados na pesquisa estão ilustrados na Figura 19.

¹⁸ Modelos substitutos são estimativas explícitas das formulações matemáticas implícitas de problemas de caixa preta, os quais são comumente abordados por procedimentos de otimização (WORTMANN, 2017).

Figura 19 – Principais *softwares* e ferramentas utilizados para a geração e representação dos modelos computacionais de projeto.



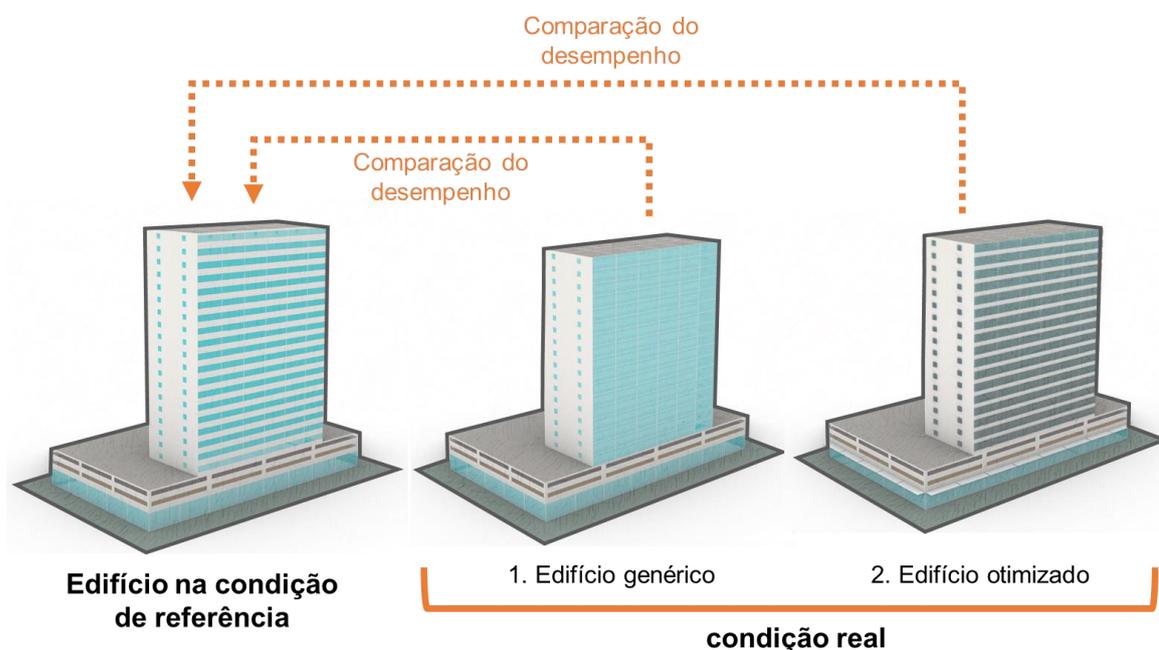
Fonte: elaborado pelo autor (2019).

3.2.2 Classificação dos edifícios

A elaboração da modelagem computacional das edificações seguiu as diretrizes propostas no RTQ-C (BRASIL., 2018), levando em consideração o objetivo de avaliar e classificar o desempenho termo energético de cada proposição de projeto. Desse modo, como destaca o próprio regulamento, devem ser elaborados duas representações do edifício, das quais se destaca: 1) condição real; e 2) condição de referência. O primeiro se caracteriza como projeto proposto com todas as características necessárias para a avaliação; já o segundo é similar a condição real – mesma forma, número de pavimentos e orientação solar –, obedecendo, em contraponto, às características listadas pela instrução normativa. Desse modo, um edifício em sua condição real é sempre seguido de sua referência, de forma a comparar o desempenho entre ambos.

É importante ressaltar que o intuito dos experimentos nesta pesquisa não é, em primeira análise, criar um projeto, mas sim propor um que represente as características reais dos edifícios de escritórios construídos na cidade de Vitória por meio de um modelo genérico. Assim sendo, a aplicação dos processos de projeto performativo permite, por conseguinte, realizar uma sequência de otimizações de desempenho energético que orienta a uma nova composição de projeto, culminando em um modelo otimizado. Sendo assim, pode-se dizer que no presente trabalho existem duas classificações de edifícios na condição real: 1) genérico; e 2) otimizado. Para deixar mais clara a dinâmica dos modelos produzidos, foi elaborada a Figura 20.

Figura 20 - Classificação dos modelos computacionais.



Fonte: elaborado pelo autor (2019).

3.2.3 Levantamento dos edifícios de escritórios

Considerando que os estudos buscaram reproduzir a realidade de uma parcela territorial previamente definida – no caso, a cidade de Vitória, ES – foram realizados procedimentos específicos visando estabelecer uma tipologia coerente com a produção arquitetônica atual. Assim, os procedimentos metodológicos para a elaboração do levantamento dos edifícios de escritório localizados na cidade de Vitória foram ordenados a partir de três critérios para auxiliar a seleção da amostra: 1) possuir múltiplos pavimentos, ou seja, ser um edifício vertical, tendo em vista que edificações

desse porte possuem maior consumo de energia elétrica; 2) ter sido finalizado dentro do recorte temporal definido entre os anos de 2003 e 2018 que representam o período após a Crise de Apagão (2001), bem como o início do PROCEL Edifica (2003) até os dias atuais; 3) estar dentro de um limite territorial (bairro ou região) que englobe outros edifícios que atendam aos critérios anteriores. Esse aspecto permite reproduzir com mais exatidão algumas características do modelo genérico por meio dos índices urbanísticos definidos pelo zoneamento, elementos do código de obras, dentre outros fatores.

Para verificar, de modo geral, as construções finalizadas dentro do recorte temporal, utilizou-se o Censo Imobiliário do SINDUSCON (SINDICATO..., 2018) que abrange os anos de 2003 a 2017. Apesar de ser uma boa fonte de dados, possui uma limitação quanto as características dos edifícios, pois abarca apenas os que possuem área de construção superior a 800 m². O Quadro 3 ilustra os edifícios de escritório construídos dentro do período estabelecido. Como se pode observar, a Enseada do Suá foi o bairro com o maior percentual de edifícios construídos. Esse aspecto reforça ainda mais o seu caráter histórico de descentralizar as atividades de comércio e serviço do centro da cidade desde a sua concepção inicial na década de 1970 com o aterramento de sua área pela Companhia de Melhoramentos e Desenvolvimento Urbano (COMDUSA) assim como em outras áreas do perímetro litorâneo do município (PREFEITURA....., 2018).

Quadro 3 - Edifícios de escritórios construídos dentro do recorte temporal do levantamento.

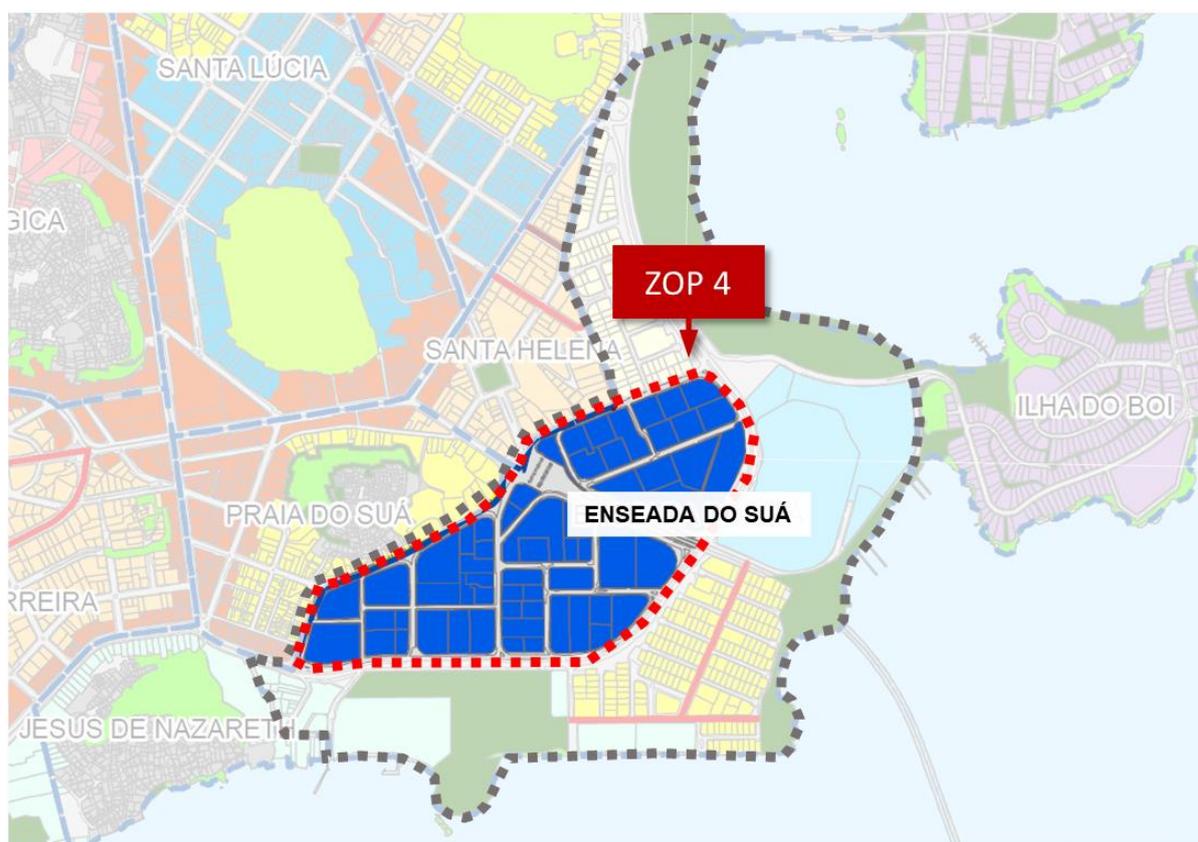
Bairro	Nome	Ano de conclusão
Enseada do Suá	Vértice Empresarial	2016
Enseada do Suá	<i>Global Tower</i>	2010
Enseada do Suá	<i>Greenwich Tower</i>	2010
Enseada do Suá	<i>Work Center Office</i>	2010
Praia do Suá	Enseada Office	2011
Mata da Praia	Ámerica Centro Empresarial	2007
Santa Luzia	Ed. Impacto Empresarial	2014

Fonte: adaptado de Sindicato da Construção Civil (2018).

A fim de fazer um levantamento mais detalhado, utilizou-se em complemento a ferramenta *Google Street View* para, por meio de uma verificação visual, selecionar todos os edifícios de escritório que não foram abarcados pelo censo do SINDUSCON. Em sequência, foi observada uma predominância de construções dentro da área

delimitada pelo Plano Diretor Urbano (PDU) como Zona de Ocupação Preferencial 4 (ZOP4), conforme destaca a Figura 21. Essa constatação foi relevante, pois auxiliou de forma indireta a definir o recorte territorial do levantamento e também os índices urbanísticos da respectiva zona a serem seguidos pelo modelo genérico. É necessário enfatizar, além disso, que em um segundo momento foi feita uma pesquisa direta com as construtoras ou administradoras de condomínio dos edifícios a fim de verificar o ano de finalização da construção. Uma vez estando dentro do recorte temporal, solicitou-se às empresas o projeto executivo do prédio para verificar detalhes construtivos, tais como materiais, tipo de ar condicionado, número de salas por pavimento dentre outros aspectos. O levantamento detalhado pode ser encontrado nos quadros disponibilizados no APÊNDICE A.

Figura 21 - Localização da ZOP 4 dentro da Enseada do Suá.



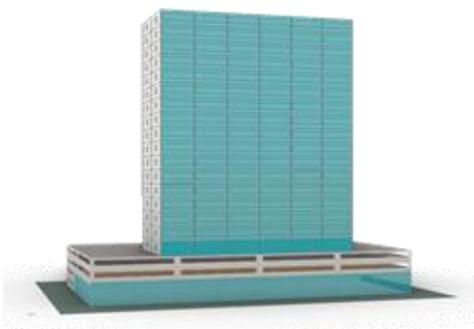
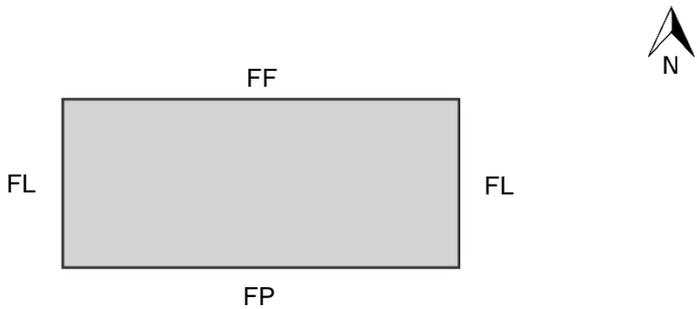
Fonte: adaptado de Prefeitura Municipal de Vitória (2018).

3.2.4 Caracterização do edifício genérico

A partir das informações coletadas no levantamento, foi feita uma comparação a fim de estabelecer características comuns que pudessem representar a arquitetura

recorrente nos recortes pré-estabelecidos. Para a criação do edifício foram definidas as áreas médias dos lotes, das salas de escritório, número de pavimentos bem como os materiais mais usuais. Desse modo, as informações dos atributos arquitetônicos do modelo genérico foram reunidas na Tabela 1. Destaca-se, entretanto, que o modelo produzido, apesar de ressaltar as particularidades da arquitetura local, pode não representar integralmente o comportamento dos edifícios da mesma tipologia espalhados pela cidade de Vitória, uma vez que possui um baixo índice de amostragem devido as particularidades do recorte territorial. Em contrapartida esses aspectos não desfavorecem ou desmerecem a pesquisa, uma vez que foi necessária tal delimitação para simular a proposição de um edifício em sua condição urbana, com índices e restrições, do mesmo modo que a sua formulação serviu apenas como teste para a metodologia proposta.

Tabela 1 - Características do edifício genérico.

Edifício Genérico		
1. Características gerais do edifício		
Dimensão do lote: 4.240 m ²	 <p>Representação esquemática do edifício.</p>	
Nº total de pavimentos: 20		
Nº de pavimentos tipo: 17		
Área dos escritórios: média de 48 m ²		
Nº de escritórios por pavimento: 12		
Pé-direito: 2,80 m		
Geometria: retangular		
Orientação solar (fachada principal): sul		
Presença de sombreadores: não possui		
3. Tipologia Arquitetônica		
FL - Fachada Lateral FF - Fachada de Fundos FP - Fachada Principal		
Forma, orientação e identificação das fachadas do pavimento tipo (sem escala).		
4. Composição dos materiais do edifício		
Paredade da fachada principal	bloco cerâmico (14x19x29cm) com com pele de vidro reflexivo azul (8 mm) - espesura de 27,5 cm	
Paredes das fachadas secundárias	bloco cerâmico (14x19x29cm) com acabamento em pintura bege clara - espessura 18 cm	
Paredes internas	Drywall com chapas duplas de gesso acartonado e isolamento de lã de rocha - espessura de 10 cm	
Composição das janelas	Esquadrias de alumínio com vidro reflexivo azul de 8 mm	
Cobertura	Laje impermeabilizada	
Lajes	Laje de concreto protendida de 20 cm de espessura	
5. Características das fachadas		
PAF- Percentual de Abertura de Fachada		
Fachada Principal	Fachadas Laterais	Fachada de Fundos
40%	6%	40%
PAF _T - Percentual de Abertura de Fachada Total		40%
6. Condicionamento de ar		
Tipo de ar-condicionado: ar-condicionado central		

Fonte: elaborado pelo autor (2019).

Para definir os dados do modelo genérico que compuseram a modelagem energética foram utilizadas algumas informações disponíveis no RTQ-C (BRASIL., 2018) no tópico pertinente as edificações de escritórios. A Tabela 2 ilustra e reúne os

parâmetros com seus respectivos valores e (ou) características. Os materiais e suas propriedades térmicas utilizados na composição da envoltória da edificação, estão detalhados no APÊNDICE B.

Tabela 2 - Detalhamento dos parâmetros do modelo genérico.

Variáveis	Edifício genérico
Geometria	
Forma	Retangular
Orientação solar (°)	Sul
Pé-direito (m)	2,80
Aberturas	
PAF - Percentual de abertura da fachada (%)	40
PAZ - Percentual de abertura zenital (%)	0
Componentes construtivos	
Parede	bloco cerâmico (14x19x29cm) com pele de vidro reflexivo azul (8 mm) - espesura de 27,5 cm
Upar - Transmitância da parede externa (w/m ² K)	1,30
αPAR - Absortância da parede (adimensional)	0,4
Ctpar - Capacidade térmica da parede (kJ/m ² K)	163,5
Cobertura	Laje protendida impermeabilizada com manta asfáltica líquida (20 cm)
Ucob - Transmitância da cobertura (W/m ² K)	1,72
Acob - Absortância da cobertura (adimensional)	0,80
Ctcob - Capacidade térmica da cobertura (kJ/m ² K)	527,30
Vidro	Reflexivo azul 8mm
FS - Fator solar do vidro (adimensional)	0,38
Uvid - Transmitância do vidro (W/m ² K)	3,35
AHS - Ângulo Horizontal de sombreamento (°)	0
AVS - Ângulo vertical de sombreamento (°)	0
AOV - Ângulo de obstrução vertical (°)	0
Iluminação e ganhos	
DPI - Densidade de potência de iluminação (W/m ²)*	10
Ocupação (m ² /pessoa)*	10
DPE - Densidade de potência de equipamentos (W/m ²)*	9,7
Horas de Ocupação (horas)*	10
Dias de ocupação (Nano)*	260
Condição do piso	Adiabático
Condição da cobertura	externo
Isolamento do piso	Sem isolamento
Condicionamento de ar (refrigeração)	
COP - Coeficiente de performance (W/W)	3,46
Temperatura de <i>setpoint</i> (°C)*	24
* Dados referentes ao RTQ-C (INEMTRO..., 2018). As outras informações foram coletadas no levantamento	

Fonte: adaptado de Brasil (2018).

3.2.5 Caracterização do edifício de referência

Como mencionado nos tópicos anteriores, todo modelo real possui, por consequência, um modelo de referência como base de comparação para o processo de avaliação de desempenho energético, de acordo com o RTQ-C (BRASIL., 2018). Sendo assim, para o presente trabalho, existe uma condição de referência para o edifício genérico, que também foi usado como base para o edifício otimizado, uma vez que não houve alteração na forma nem na orientação solar. Determinadas características, como por exemplo, o percentual de abertura da fachada (PAF), os componentes construtivos, densidade de iluminação (DPI), ganhos, e condicionamento de ar são pré-definidas pela instrução normativa, conforme ilustra a Tabela 3.

Tabela 3 - Detalhamento dos parâmetros do modelo de referência.

Variáveis	Edifício de referência
Geometria	
Forma	Retangular
Orientação solar (°)	Sul
Pé-direito (m)	2,80
Aberturas	
PAF - Percentual de abertura da fachada (%)	40
PAZ - Percentual de abertura zenital (%)	0
Componentes construtivos	
Parede	Argamasa interna (2,5 cm), bloco cerâmico furado (9 cm), argamassa externa (2,5 cm)
Upar - Transmitância da parede externa (w/m ² K)	2,39
αPAR - Absortância da parede (adimensional)	0,5
Ctpar - Capacidade térmica da parede (kJ/m ² K)	150
Cobertura	Telha de fibrocimento, câmara de ar (>5 cm) e laje maciça de concreto (10 cm)
Ucob - Transmitância da cobertura (W/m ² K)	2,06
Acob - Absortância da cobertura (adimensional)	0,8
Ctcb - Capacidade térmica da cobertura (kJ/m ² K)	233
Vidro	vidro simples incolor 6mm
FS - Fator solar do vidro (adimensional)	0,82
Uvid - Transmitância do vidro (W/m ² K)	5,7
AHS - Ângulo Horizontal de sombreamento (°)	0
AVS - Ângulo vertical de sombreamento (°)	0
AOV - Ângulo de obstrução vertical (°)	0
Iluminação e ganhos	
DPI - Densidade de potência de iluminação (W/m ²)	14,1
Ocupação (m ² /pessoa)	10
DPE - Densidade de potência de equipamentos (W/m ²)	9,7
Horas de Ocupação (horas)	10
Dias de ocupação (Nano)	260
Condição do piso	Adiabático
Condição da cobertura	externo
Isolamento do piso	Sem isolamento
Condicionamento de ar (refrigeração)	
COP - Coeficiente de performance (W/W)	2,6
Temperatura de <i>setpoint</i> (°C)	24

Fonte: adaptado de Brasil (2018).

3.2.6 Caracterização do edifício otimizado

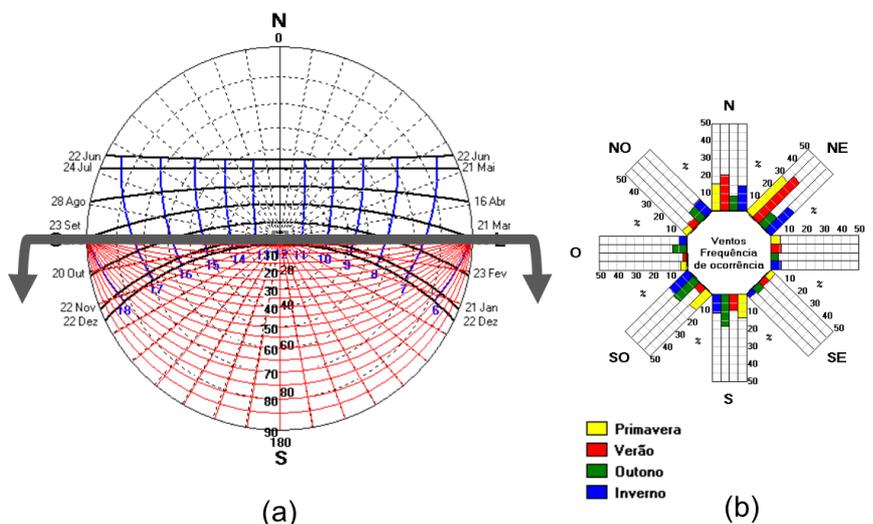
Um aspecto elementar do método de projeto performativo, que deve ser considerado, é o fato de proporcionar que os resultados de desempenho das simulações orientem as alterações no edifício por meio dos procedimentos de otimização. Essa técnica é conhecida na literatura como “*form finding*”, ou seja, “encontrar a forma”. Desse modo,

pode-se afirmar que o edifício otimizado representa a combinação de parâmetros que possibilita a solução com o maior nível de eficiência energética, tendo em vista o conjunto de variáveis determinado pelo projetista. A organização dessas informações, por sua vez, foi estabelecida a fim de que os resultados fossem coerentes e atendessem as especificidades do local de inserção da edificação. Fez-se necessária, portanto, a análise das condicionantes climáticas da cidade de Vitória juntamente com a associação de conhecimentos técnico-científicos para a composição das variáveis e posterior automatização dos processos.

Sendo assim, de acordo com a classificação climática de Köppen, o clima do município pode ser categorizado como tropical quente, devido a sua inserção em uma região litorânea, sendo marcado por uma estação seca no inverno e úmida no verão (ALVARES *et al.*, 2013). A temperatura média anual varia entre 24-26 °C, com máximas de 30 °C e mínimas 18 °C conforme os dados das normais climatológicas¹⁹ referentes ao período entre 1984 e 2014 (INSTITUTO..., 2019). Os ventos possuem uma frequência maior de ocorrência na direção nordeste, sendo que a orientação sul – pertinente a fachada principal dos edifícios do levantamento – possui maior incidência solar nos meses de outubro a fevereiro, conforme ilustra a Figura 22.

¹⁹ São valores médios calculados para um período relativamente longo e uniforme, compreendendo no mínimo três décadas consecutivas

Figura 22 – (a) Carta solar de Vitória com destaque para a orientação sul e (b) rosa dos ventos com frequência de ocorrência dos ventos.



Fonte: adaptado do software Analysis SOL-AR (2019).

Diante desse cenário, deve-se levar em consideração também o impacto médio de 30% do sistema vedação e 40% do de refrigeração no valor total de consumo de energia elétrica nos edifícios brasileiros (BRASIL..., 2013). Assim sendo, a escolha dos elementos arquitetônicos, tais como os componentes construtivos, e de seus dispositivos complementares, como o sistema de condicionado, foram direcionados a alternativas que favorecem um maior desempenho energético. Uma das principais estratégias em locais que apresentam um clima semelhante ao descrito é fornecer os meios adequados para que a temperatura interna da edificação permaneça mais baixa que o ambiente externo e por consequência exija menos do sistema de refrigeração (XU *et al.*, 2017).

Uma das características determinantes para o baixo desempenho de uma parcela significativa dos edifícios de escritório brasileiros é adoção da tipologia proposta por um “estilo internacional de arquitetura”, com grandes panos de vidro, desconsiderando-se, muitas vezes, o clima local (NEVES; MARQUES, 2017). Essa estética, que tem por objetivo a demonstração de poder econômico, traz seus reflexos nos edifícios de Vitória, como pode ser observado no APÊNDICE A. Por outro lado, a utilização adequada de elementos, como vidros com controle de radiação solar e dispositivos de sombreamento – principalmente quando o Percentual de Abertura de Fachada (PAF) é igual ou maior do que 40% – podem impactar positivamente os gastos com energia elétrica com a redução de iluminação e radiação excessivas

(ABDIN; EL BAKERY; MOHAMED, 2018; ASTE *et al.*, 2018). Sendo assim, os tipos de vidros propostos, bem como suas propriedades térmicas estão ilustradas no APÊNDICE C. Já no que diz respeito ao sombreamento da fachada, definiu-se a utilização de brises horizontais, devido à orientação solar na direção sul, tendo como alvo sombrear os escritórios durante o horário comercial nos períodos de maior incidência solar (10h às 18h).

Por se tratar de um estudo hipotético, e por consequência o edifício ser analisado de forma isolada, sem a presença de edifícios no entorno, a fachada posterior a principal obteve o mesmo tratamento. Entretanto, por possuir a orientação norte, a incidência de radiação solar no decorrer do ano é maior do que na sua face oposta. Além dos procedimentos para obter um maior sombreamento, adotou-se a técnica de dimerização do sistema de iluminação artificial para reduzir automaticamente a sua intensidade de uso quando a luz natural estivesse dentro do valor médio de 300 lux descrito pela NBR 5413 (ASSOCIAÇÃO..., 1992) como valor adequado para iluminância interna de ambientes de escritórios.

No que diz respeito a escolha dos materiais de composição da envoltória, um dos critérios principais foi determinar uma baixa transmitância térmica, de modo a evitar acúmulo de calor dentro da edificação. Como nas fachadas laterais da maior parcela dos prédios do levantamento é comum um baixo PAF, representado apenas pelas aberturas dos banheiros, e por ter orientações que incidem uma intensa radiação solar em períodos específicos, como no início da manhã e fim da tarde, os materiais das paredes apresentam um papel relevante no desempenho. À vista disso, uma estratégia recorrente, a qual foi adotada durante os testes desta pesquisa, é a aplicação de isolamento térmico nas paredes externas (D'AGOSTINO *et al.*, 2019). Vale ressaltar que também foram testadas composições que são tradicionalmente utilizadas nas construções, as quais tem como elemento principal o bloco de concreto e bloco cerâmico. Para ilustrar de modo detalhado os materiais utilizados no edifício, foram elaboradas tabelas disponibilizadas no APÊNDICE D.

Sob uma perspectiva geral, os elementos de vedação da envoltória estão estritamente relacionados com o uso do sistema de refrigeração. Nessa acepção, quanto menor o desempenho da vedação, mais se exige para o resfriamento dos ambientes. Em edifícios de caráter comercial e de serviços são necessárias, com frequência, altas

cargas térmicas para o resfriamento devido à fatores como temperatura operativa e tipo de roupa que podem afetar diretamente o desempenho dos trabalhadores (MAYKOT; RUPP; GHISI, 2018). Essa situação proporciona, em muitas ocasiões, um consumo de energia elétrica indesejável. A fim de remediar essa situação, optou-se pela escolha do sistema *Variable Refrigerant Flow* (VRF), em contraposição aos tradicionais *Variable Air Volume* (VAV), que devido as suas particularidades de operação e distribuição do ar frio no edifício, possibilitam um maior controle e desempenho em cada ambiente (KIM; JEON; KIM, 2016; YU *et al.*, 2016). No APÊNDICE E estão descritas as características e particularidades do sistema de do ar condicionado.

Em relação a geometria da edificação, as propostas de alteração foram feitas nas dimensões do pavimento tipo (largura e comprimento), número de salas (que implica na área das mesmas), assim como também na área de ocupação do terreno a qual se relaciona com o coeficiente de aproveitamento e conseqüentemente com o número de pavimentos. Essas características permitem analisar uma maior gama de possibilidades de configuração do edifício dentro do lote, tendo por base os mesmos valores utilizados na configuração inicial, ou seja, mesma área de ocupação e mesmo coeficiente de aproveitamento. Entretanto, é importante lembrar que, esses testes não almejam esgotar as possibilidades de configuração do projeto, mas demonstrar o potencial do método de projeto performativo na prática projetual. Ressalta-se também, que algumas características como ocupação, densidade de potência de equipamentos, horas e dias de ocupação permaneceram fixos tanto no edifício genérico como no otimizado. A Tabela 4 ilustra os valores adotados na elaboração do edifício otimizado.

Tabela 4 - Detalhamento dos parâmetros do edifício otimizado.

Variáveis	Edifício otimizado
Geometria	
Forma	Retangular
Orientação solar (°)	Sul
Pé-direito (m)	2,80
Aberturas	
PAF - Percentual de abertura da fachada (%)	30 / 35 / 40 / 45 / 50 / 55 / 60 / 65 / 70 / 75 / 80
PAZ - Percentual de abertura zenital (%)	0
Componentes construtivos	
Parede	bloco cerâmico / bloco de concreto(14x19x29cm) com e sem isolamento térmico
Upar - Transmitância da parede externa (w/m ² K)	2,75 / 1,84 / 0,34 / 0,38
αPAR - Absortância da parede (adimensional)	0,4
Ctpar - Capacidade térmica da parede (kJ/m ² K)	218,33 / 151,30 / 153,03 / 220,05
Cobertura	Laje protendida impermeabilizada com manta asfáltica líquida (20 cm)
Ucob - Transmitância da cobertura (W/m ² K)	1,72
Acob - Absortância da cobertura (adimensional)	0,80
Ctcob - Capacidade térmica da cobertura (kJ/m ² K)	527,30
Vidro	vidro simples / vidro duplo 1 / vidro duplo 2 / vidro triplo
FS - Fator solar do vidro (adimensional)	0,38 / 0,27 / 0,29 / 0,24
Uvid - Transmitância do vidro (W/m ² K)	3,35 / 1,15 / 1,47 / 0,67
AHS - Ângulo Horizontal de sombreamento (°)	0
AVS - Ângulo vertical de sombreamento (°)	0
AOV - Ângulo de obstrução vertical (°)	0
Iluminação e ganhos	
DPI - Densidade de potência de iluminação (W/m ²)*	10
Ocupação (m ² /pessoa)*	10
DPE - Densidade de potência de equipamentos (W/m ²)*	9,7
Horas de Ocupação (horas)*	10
Dias de ocupação (Nano)*	260
Condição do piso	Adiabático
Condição da cobertura	externo
Isolamento do piso	Sem isolamento
Condicionamento de ar (refrigeração)	
COP - Coeficiente de performance (W/W)	5,67
Temperatura de <i>setpoint</i> (°C)*	24
* Dados referentes ao RTQ-C (BRASIL, 2018).	

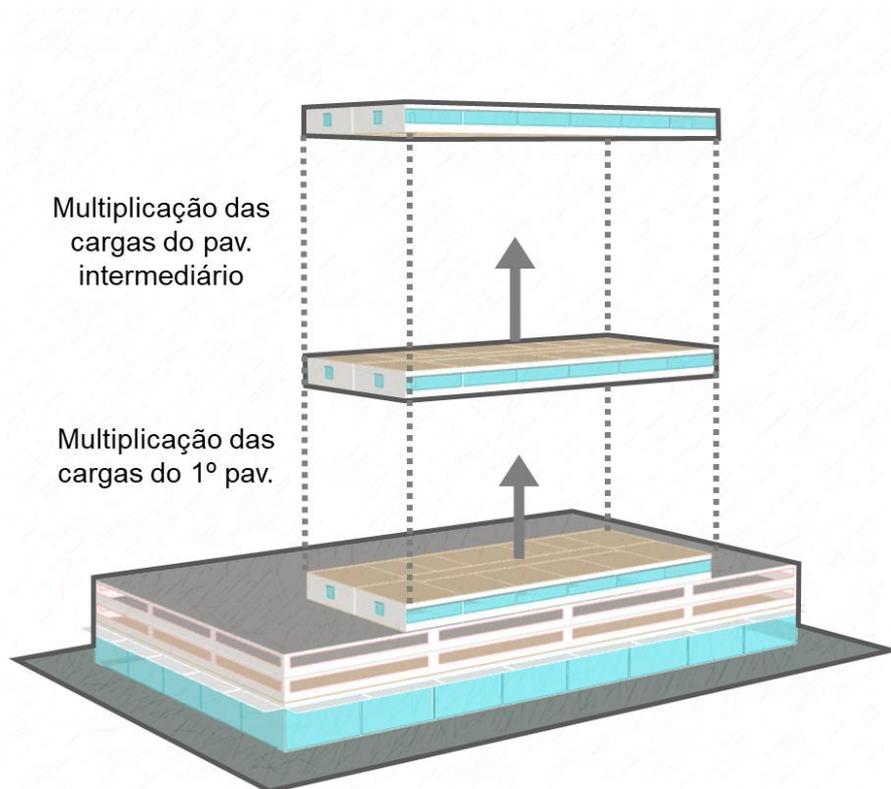
Fonte: adaptado de Brasil (2018).

3.2.7 Modelagem e estruturação do sistema generativo de projeto

Deve-se observar que os procedimentos elaborados para os experimentos do método de projeto performativo, permitem, em sua etapa inicial de geração e representação, o processo criativo do projetista. É neste momento que se define a forma, as variáveis

e a inter-relação entre os elementos que serão trabalhados no edifício. Destaca-se, porém, que nos testes executados no âmbito desta pesquisa, a forma foi condicionada pelo resultado gerado no levantamento. Outro aspecto fundamental relacionado à forma é que, devido a aplicação dos procedimentos ser feita na etapa inicial de projeto, torna-se louvável que o tempo dispendido na execução da simulação e otimização seja curto. Isso implica, por consequência, na simplificação da forma de modelagem. Desse modo, assim como indicam o documento de “dicas e truques” do Energy Plus (UNITED..., 2018) e a pesquisa elaborada por Picco, Lollini e Marengo (2014), é uma prática comum reduzir o número de pavimentos utilizados quando as edificações possuem ambientes com configurações semelhantes. Nesses casos, são selecionados os pavimentos da extremidade (primeiro tipo e cobertura), além do intermediário, sendo que o restante tem suas cargas multiplicadas, conforme ilustra a Figura 23.

Figura 23 - Método de simplificação da modelagem.



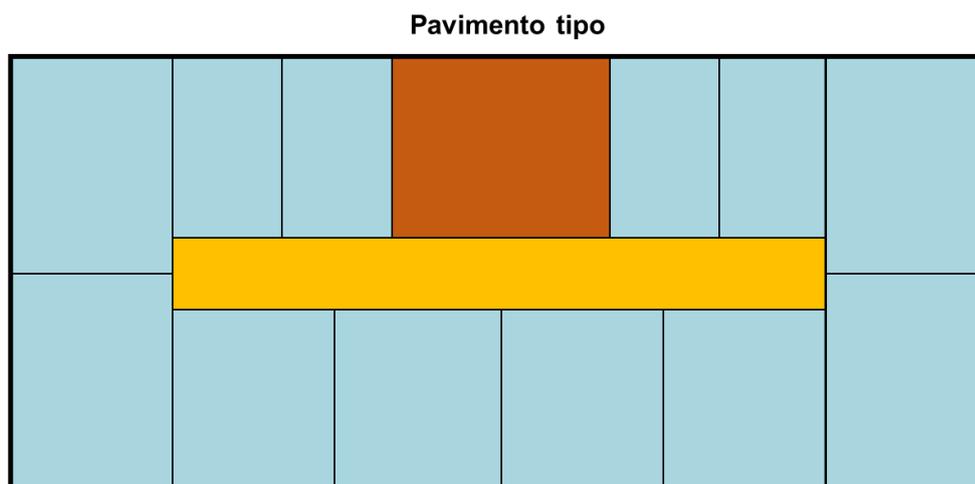
Fonte: elaborado pelo autor (2019).

Esse procedimento é mais recomendável nos casos em que os edifícios são totalmente climatizados, uma vez que o coeficiente de pressão dos ventos poderia impactar numa variação de consumo de energia entre os pavimentos em situações

em que se possibilitam a ventilação natural. Nesse sentido, a adoção de um edifício totalmente climatizado seguiu a tendência de simplificação da modelagem, o que pode ser caracterizado, por outro lado, como uma limitação pontual dos experimentos por não abranger todas as formas de estratégia passiva de redução no consumo de energia elétrica. Considerando esses aspectos, assim como os objetivos da pesquisa, pode-se afirmar que a modelagem foi elaborada em duas etapas que estão correlacionadas: 1) Definição da forma e suas relações; e 2) modelagem energética.

Na primeira fase, foram estabelecidos os elementos base para a parametrização do sistema como os índices do PDU, requisitos do código de obras, e as configurações do programa de necessidades da edificação a fim de estruturar a disposição geométrica dos edifícios. Nesse caso, como principais índices, destacam-se: 1) taxa de ocupação; 2) taxa de permeabilidade; 3) coeficiente de aproveitamento; e 4) gabarito (BRASIL, 2018). Foram acrescentadas também, as distâncias pertinentes aos afastamentos, a fim de obter as modificações conforme a alteração do número de pavimentos. Em relação ao Código de Obras (PREFEITURA..., 1998), foi utilizado nesta etapa o critério que estabelece a dimensão máxima da profundidade dos compartimentos bem como a área mínima das aberturas. Ressalta-se, além disso, que o programa de necessidades seguiu a tipologia básica dos edifícios de escritório de Vitória, com as áreas de circulação horizontal e vertical, bem como as salas de escritório (Figura 24). O pavimento da garagem, assim como as lojas presentes no térreo, foi elaborado como bloco único sem divisões internas, uma vez que não são representativos no consumo total de energia elétrica. O esquema referente às relações geométricas que nortearam a estruturação do sistema está ilustrado na Figura 25.

Figura 24 - Setorização dos ambientes no pavimento tipo esquemático.

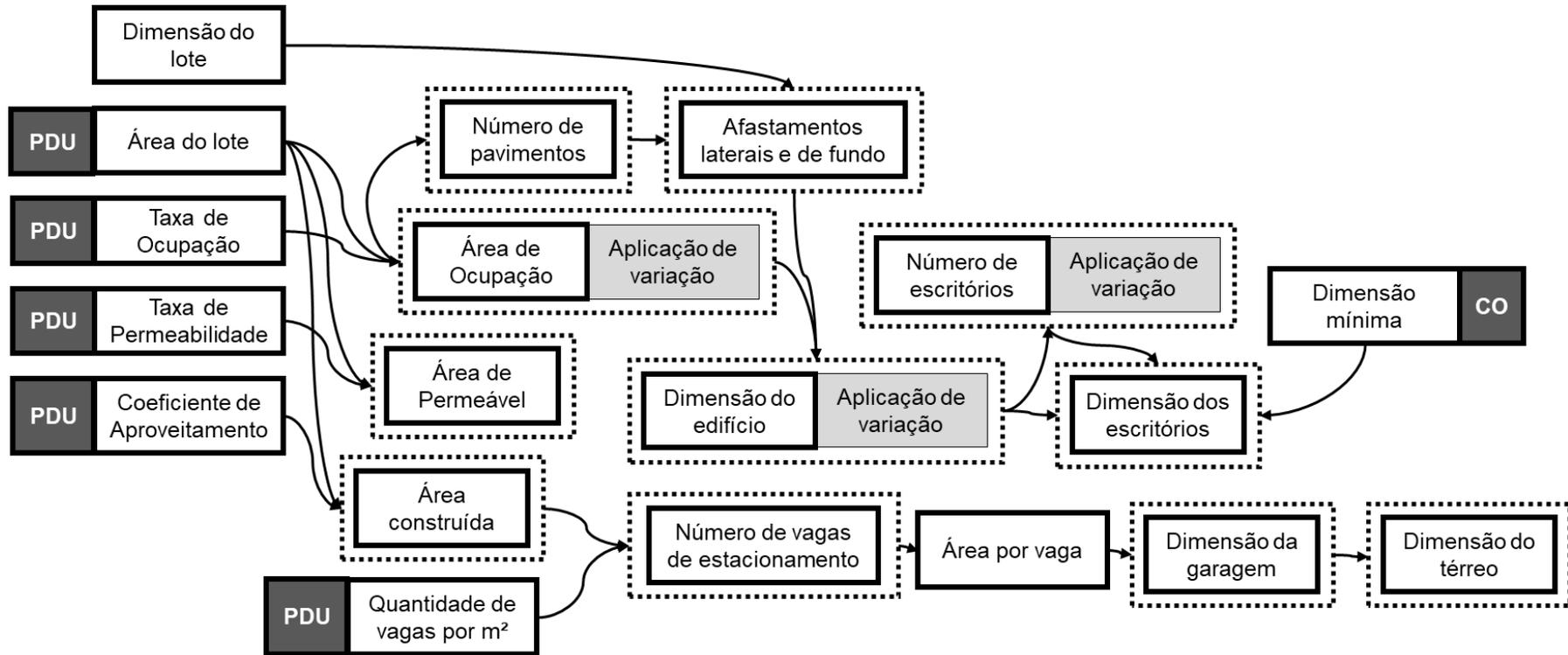


Legenda:

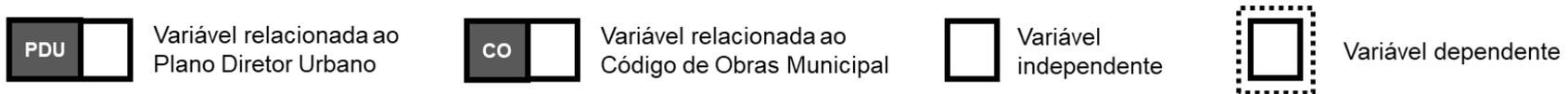
 Circulação vertical  Circulação horizontal  Escritórios

Fonte: elaborado pelo autor (2019).

Figura 25 – Esquema relacional entre os parâmetros da configuração geométrica do sistema generativo de projeto.



Legenda:



Fonte: elaborado pelo autor (2019).

Na segunda etapa, foram executadas as configurações da modelagem energética para a composição do sistema generativo. Um aspecto essencial, nesse caso, foi estabelecer um encadeamento das informações para a composição do ciclo da sequência de decisões, a fim de obter um funcionamento adequado do processo de otimização. Para tanto, os ambientes gerados na etapa anterior passam a compor as zonas térmicas²⁰, delimitando-as de acordo com suas respectivas funções. Nesse estágio, além de solucionar as adjacências para a troca de calor entre as superfícies do edifício, foram criadas as janelas – conforme as restrições do código de obras – e os materiais de construção. As cargas térmicas, cronogramas de uso dos sistemas (refrigeração e iluminação), bem como o padrão de ocupação foram inseridos como *input*²¹ no projeto. Vale destacar que todas essas informações pertinentes aos dados de entrada são fundamentadas em normas e regulamentos como: RTQ-C (BRASIL., 2018), NBR 16401 (ASSOCIAÇÃO..., 2008), NBR 5413 (ASSOCIAÇÃO..., 1992).

Três aspectos também desempenharam um papel essencial para a modelagem energética: 1) parâmetros do clima, do qual se obtém os dados a partir do arquivo climático da localidade; 2) tipo de ventilação, que define a forma de condicionamento dos ambientes; e 3) especificações da simulação, onde se delimitam o período e o tipo de análise. Em acréscimo, relacionou-se o dado de saída, pertinente ao consumo de energia elétrica, aos elementos sujeitos a variações durante a otimização. A Figura 26 elucida, de forma simplificada, como foram ajustados os parâmetros na estruturação da modelagem paramétrica. Vale destacar, portanto, que diferente dos procedimentos tradicionais, o fluxo de trabalho desenvolvido em VPL permitiu maior agilidade não só no ajuste de configurações, mas também na detecção de possíveis erros.

²⁰ É um espaço ou conjunto espaços que tem condições similares de resfriamento, aquecimento, iluminação, dentre outros fatores que compõem as características específicas dos ambientes para estimar o consumo de energia elétrica.

²¹ Dado de entrada

3.3 ETAPA 3: OTIMIZAÇÃO E AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO ENERGÉTICO

Para a elaboração dos procedimentos metodológicos de otimização, utilizou-se como base três etapas destacadas por Nguyen, Reiter e Rigo (2014), as quais compreendem: 1) pré-processamento; 2) execução da otimização; e 3) pós-processamento. De acordo com Tian e outros (2018a), cerca de 61,5% dos estudos relacionados à otimização se baseiam nesses três procedimentos. Vale destacar que a fase de pós-processamento foi realizada na etapa seguinte, a qual compreende a sistematização dos dados. Por outro lado, como já apontado anteriormente, para o processo de avaliação e classificação do desempenho energético foi utilizada a metodologia proposta pelo RTQ-C (BRASIL., 2018).

3.3.1 Pré-processamento

3.3.1.1 Caracterização do problema de otimização

A fase de pré-processamento tem uma função primordial para o sucesso da otimização por meio da organização e sistematização das tarefas do denominado “problema de otimização”, que neste caso, se caracteriza como a eficiência energética dos edifícios de escritórios na cidade de Vitória-ES. Para esta condição, a classificação da otimização foi definida por ser multidimensional²², dinâmica²³, e de programação linear mista, devido às múltiplas variáveis de projeto associadas, as quais são do tipo discreta e contínua, de natureza mutuamente dependente. Vale destacar que as variáveis inseridas no processo são posteriormente descritas de forma mais clara no subcapítulo 3.3.4 que aborda o planejamento dos experimentos.

3.3.1.2 Definição do objetivo da otimização de desempenho energético

O objetivo da otimização tem como propósito resumir, por meio de uma função matemática, o critério de avaliação dos procedimentos de desempenho. Nesse sentido, o presente estudo adotou um critério de objetivo único, que oferece suporte

²² É influenciada por diversas variáveis. Quando a otimização se relaciona com apenas uma variável pode ser chamada de unidimensional.

²³ Pois é realizada sequencialmente.

para a classificação do nível de eficiência energética da edificação segundo os critérios delimitados pelo RTQ-C (BRASIL., 2018). Desse modo, tanto a função como seus respectivos parâmetros são descritos na Equação 1.

$$CEP = ((CIL + CCAe + CEQ).fcE) + (CCAtt.fcT) \quad (\text{Equação 1})$$

Fonte: adaptada de Brasil (2018).

Onde:

CEP – consumo de energia primária

CIL – consumo do sistema de iluminação (kWh/ano);

CCAe – consumo do sistema de energia elétrica do sistema de condicionamento de ar (kWh/ano);

CEQ – consumo de equipamentos/tomadas (kWh/ano);

CCAtt – consumo de energia térmica do sistema de condicionamento de ar (kWh/ano);

fcE – fator de conversão de energia elétrica (1,6);

fcT – fator de conversão de energia térmica (1,1).

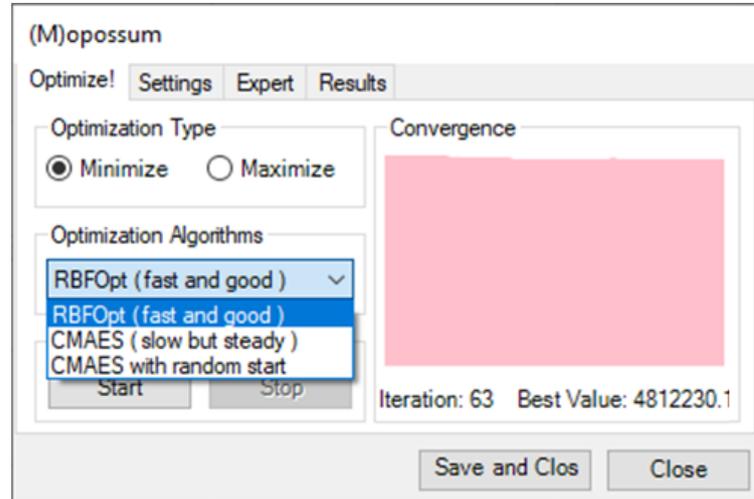
3.3.2 Execução da Otimização

As otimizações foram realizadas em um único computador pessoal²⁴, a partir da ferramenta *Opossum*, a qual possui uma interface simples, com quatro menus para a edição de configurações pelo projetista. Em sua primeira aba de configurações (Figura 27), é possível escolher entre minimizar e maximizar o objetivo, além de ser possível a escolha entre três diferentes algoritmos, os quais possibilitam alteração do método de busca por soluções. Para esta pesquisa, utilizou-se a minimização dos dados de saída do objetivo, ou seja, a combinação de variáveis que resulte em um menor valor de CEP, a partir das simulações realizadas no *Honeybee* por meio do *EnergyPlus*. Em relação ao algoritmo, foi selecionado o RBFOpt *defalut* (padrão do *Opossum*), pois possui um processamento mais rápido e possibilita resultados satisfatórios. Vale enfatizar que nessa mesma aba de configuração existe o gráfico de iterações em

²⁴ O Computador possui como configuração: processador Intel® Core™ i7, memória de 16 gb, HD 1 Tb e SSD 250 gb. Placa de vídeo Quadro K2020.

tempo real em que se pode constatar a presença de erros e verificar a convergência dos resultados durante o procedimento.

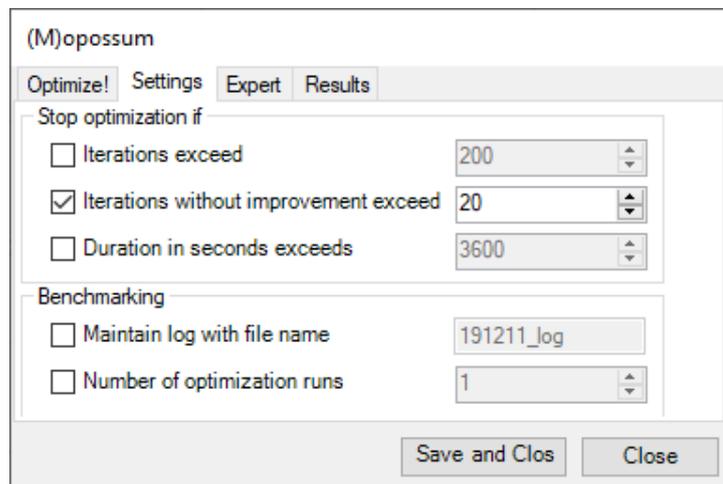
Figura 27 - Aba de configurações do Opossum.



Fonte: adaptado de Opossum (2019).

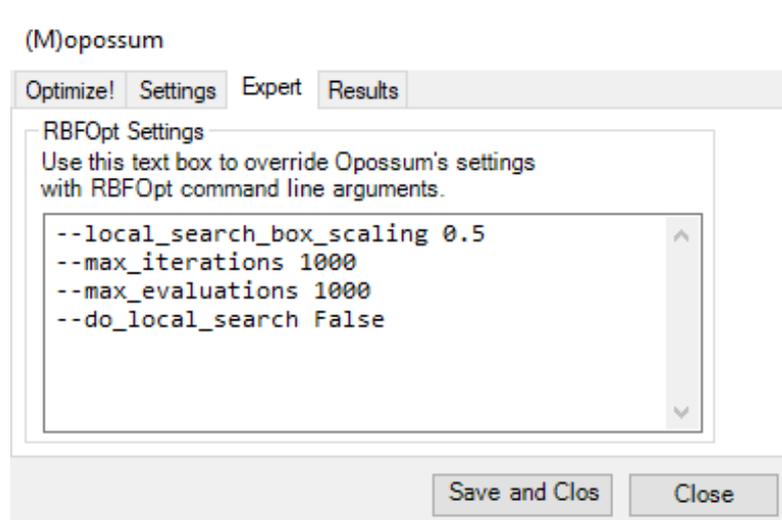
Na segunda aba (Figura 28), são definidos os critérios de término do processo, com: 1) número de máximo de iterações; 2) quantidade de iterações sem melhoria; e 3) duração da otimização em segundos. Para esta pesquisa, optou-se apenas como critério de término da otimização o número de interações sem melhoria expressiva, com o valor padrão igual a 20. Sendo assim, a ferramenta faz uma busca mais abrangente, possibilitando uma aproximação maior com o resultado ótimo para o conjunto de variáveis definidas. Por fim, as duas últimas abas de configuração são para a definição dos parâmetros em linhas de comando (Figura 29), para especialistas, além dos resultados que trazem os valores do objetivo e das variáveis empregadas (Figura 30).

Figura 28 - Aba com os critérios de término da otimização.



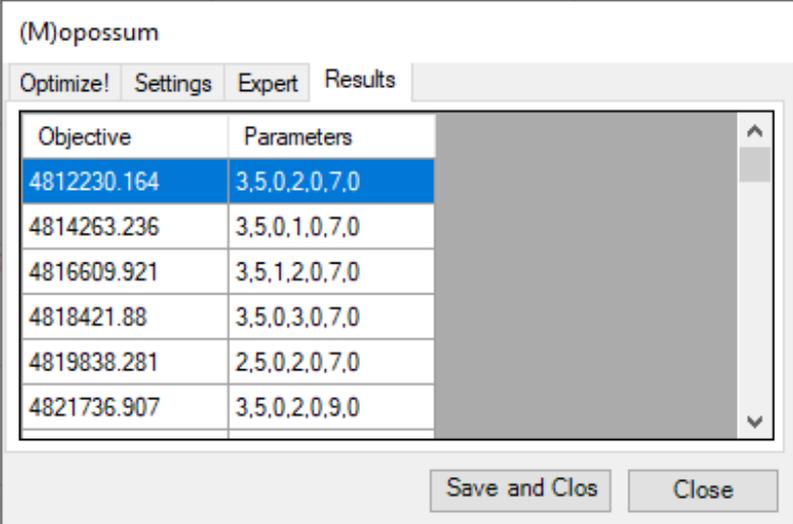
Fonte: adaptado de Opossum (2019).

Figura 29 - Aba com configuração para programação escrita para experts.



Fonte: adaptado de Opossum (2019).

Figura 30 - Aba com os resultados.



Objective	Parameters
4812230.164	3,5,0,2,0,7,0
4814263.236	3,5,0,1,0,7,0
4816609.921	3,5,1,2,0,7,0
4818421.88	3,5,0,3,0,7,0
4819838.281	2,5,0,2,0,7,0
4821736.907	3,5,0,2,0,9,0

Fonte: adaptado de Opossum (2019).

Para armazenar e tabular o conteúdo da otimização – tanto no que se refere as variáveis como em relação ao objetivo – foi necessário o auxílio da ferramenta *TT Toolbox*²⁵. Uma de suas funcionalidades é transpor os dados de todas as iterações em uma planilha em Excel no formato “.csv”. Outra capacidade diz respeito a captação de imagens de todas as modificações. Dessa forma, além de memorizar os resultados, a ferramenta tornou possível a interação com uma plataforma de cruzamento e organização de dados *online* chamada *Design Explorer*. Todos esses procedimentos foram realizados para tornar as informações mais compreensíveis e visualmente atrativas.

3.3.3 Avaliação de desempenho energético

Após o cálculo do consumo de energia primária dos edifícios na condição real e de referência, foi necessário seguir seis passos para a classificação do nível de eficiência energética, conforme a metodologia do RTQ-C (BRASIL., 2018). No primeiro passo foi calculado o percentual de redução do consumo de energia primária da edificação ($PRCEP_{REAL-D}$) em sua condição real (CEP) e em sua condição de referência (CEP_{REF}), conforme demonstra a Equação 2. Posteriormente, obteve-se o valor do fator de forma (FF), por meio do cálculo presente na Equação 3, para assim alcançar

²⁵ Plugin do Grasshopper que possui diferentes funcionalidades para armazenamento de dados

o coeficiente de redução do consumo de energia primária da classe D para a classe A ($CRCEP_{D-A}$), de acordo com a Tabela 5.

$$PRCEP_{real-d} = 1 - \frac{CEP}{CEP_{ref}} * 100 \quad (\text{Equação 2})$$

Fonte: Adaptada de Instituto Nacional de Metrologia (2018).

Onde:

PRCEP_{real-d} – percentual de redução do consumo de energia primária entre a edificação em sua condição real e condição de referência;
CEP – consumo de energia primária da edificação em sua condição real (kWh/ano);
CEP_{ref} – consumo de energia primária da edificação em sua condição e referência (kWh/ano).

$$FF = \frac{A_{env}}{V_{tot}} \quad (\text{Equação 3})$$

Fonte: Adaptada de Instituto Nacional de Metrologia (2018).

Onde:

FF – fator de forma da edificação (m²/m³)

A_{env} – área da envoltória (m²)

V_{tot} – volume total construído da edificação (m³)

Tabela 5 - Coeficiente de redução do consumo de energia primária da classe D para a A (CRCEPDD-A) para edifícios de escritório.

Grupo Climático	Coeficiente de redução do consumo de energia primária da classe D para a classe A (CRCEP _{D-A})				
	FF ≤ 0,20	0,20 < FF ≤ 0,30	0,30 < FF ≤ 0,40	0,40 < FF ≤ 0,50	FF > 0,50
GCL 1- A	0,30	0,33	0,35	0,36	0,36
GCL 1- B	0,30	0,32	0,34	0,35	0,36
GCL 2	0,30	0,32	0,34	0,35	0,35
GCL 3					
GCL 4					
GCL 5	0,29	0,32	0,34	0,35	0,35
GCL 6					
GCL 7	0,29	0,32	0,33	0,34	0,35
GCL 8					
GCL 9	0,30	0,33	0,35	0,36	0,36
GCL 10	0,31	0,34	0,36	0,37	0,38
GCL 11	0,30	0,33	0,35	0,36	0,36
GCL 12					
GCL 13					
GCL 14	0,30	0,32	0,35	0,36	0,36
GCL 15					
GCL 16	0,29	0,31	0,33	0,34	0,35
GCL 17	0,28	0,30	0,32	0,33	0,33
GCL 18	0,28	0,30	0,32	0,33	0,33
GCL 19	0,28	0,31	0,33	0,34	0,34
GCL 20					
GCL 21	0,29	0,32	0,34	0,35	0,36
GCL 22					
GCL 23	0,29	0,31	0,33	0,34	0,35
GCL 24					

Fonte: Brasil (2018, p. 17).

Para classificar a edificação proposta foi definido o coeficiente “i” que representa os intervalos relativos a cada uma das classes de eficiência energética por meio da Equação 4. Desse modo, foram preenchidos os itens da Tabela 6 a fim de categorizar o desempenho, tendo em vista que caso a condição real da edificação apresentasse o CEP superior a condição de referência, sua classificação seria E. Por fim, o último passo foi comparar o consumo de energia primária da edificação (CEP_{REAL-D}) identificado pelos limites da para obter a classe de eficiência da edificação em avaliação.

$$i = \frac{(CE_{Pref} * CR_{CEPd} - a)}{3} \quad (\text{Equação 4})$$

Fonte: adaptada de Brasil (2018).

Onde:

i – coeficiente que representa o valor entre as classes;

CE_{Pref} – consumo de energia primária da edificação em sua condição de referência (kWh/ano);

$PRECEPd-a$ – coeficiente de redução do consumo de energia primária da classe D para a classe A.

Tabela 6 - Classificação do nível de eficiência energética.

Classe de eficiência	A	B	C	D	E
Limite superior	–	$> CE_{REF} - 3i$	$> CE_{REF} - 2i$	$> CE_{REF} - i$	$> CE_{REF}$
Limite inferior	$< CE_{REF} - 3i$	$\leq CE_{REF} - 2i$	$\leq CE_{REF} - i$	$\leq CE_{REF}$	–

Fonte: (BRASIL, 2018, p. 17).

3.3.4 Planejamento de experimentos

A fim de esclarecer os procedimentos experimentais para a proposição do método de projeto performativo, foram agrupados e classificados os dados de entrada das edificações, sendo paralelamente estruturada a dinâmica de execução dos testes. Destaca-se que apesar do sistema de ar condicionado desempenhar um papel significativo na eficiência energética da edificação, não foram estudados diversos modelos e sua respectiva aplicação, mas foi proposta apenas uma solução. Devido a este fato, o sistema não foi inserido no processo de otimização, sendo dada uma maior ênfase a aspectos diretamente ligados aos elementos arquitetônicos. Considerando o exposto, os **Erro! Fonte de referência não encontrada.** e 5, assim como as **Erro! Fonte de referência não encontrada.** e 8 apresentam de forma detalhada as variáveis de resposta, fatores controláveis, constantes e de ruído do projeto a fim de auxiliar na reprodução ou adaptação de novas modelagens e (ou) experimentos.

Em relação à sequência de execução dos testes, podem ser destacadas três etapas: 1) análise do edifício genérico, a qual avalia e classifica o desempenho energético do edifício genérico obtido no levantamento em comparação com o seu respectivo edifício de referência; 2) proposta de otimização restrita, que propõe alterações em configurações básicas do edifício, como por exemplo os materiais de vedação, sem modificar aspectos formais

Quadro 4 - Variáveis de resposta dos experimentos.

Variáveis de resposta	Unidade
Consumo de energia primária (CEP)	kWh/ano

Fonte: elaborado pelo autor (2019).

Tabela 7 - Fatores controláveis nos experimentos.

Fator	Nº de níveis	Níveis	Unidade
Tipo de vidro	4	Vidro simples / vidro duplo / vidro duplo 2 / vidro triplo	-
PAF	11	30 / 35 / 40 / 45 / 50 / 55 / 60 / 65 / 70 / 75 / 80	%
Dimensão dos sombreadores	4	0,10 / 0,20 / 0,30 / 0,40	m
Número de sombreadores	6	1 / 2 / 3 / 4 / 5 / 6	-
Angulação dos sombreadores	4	0 10 20 30	°
Materiais de composição da parede	4	2,75 / 1,84 / 0,34 / 0,38	W/(m²/K)
Área do pavimento tipo	6	848 / 795 / 748 / 706 / 670 / 636	m²
Largura do edifício	6	35 / 36 / 37 / 38 / 39 / 40	m
Número de salas	5	6 / 9 / 12 / 13 / 14	-

Fonte: elaborado pelo autor (2019).

Tabela 8 - Fatores constantes nos experimentos.

(continua)

Fator	Valor	Unidade	Fonte
Pé-direito	2,8	m	Levantamento
Densidade de equipamentos	9,7	W/m²	RTQ-C (INSTITUTO..., 2018)
Densidade de pessoas	10	pessoas/m²	RTQ-C (INSTITUTO..., 2018)
Ventilação por área	0,0004	m³/s/m²	NBR 16401-3 (ASSOCIAÇÃO..., 2008)
Ventilação por pessoa	0,0031	L/s/pessoa	NBR 16401-3 (ASSOCIAÇÃO..., 2008)
Tempo de ocupação diário	10	h	RTQ-C (INSTITUTO..., 2018)
Nível de atividade	120	-	Biblioteca do Energy Plus

Tempo de uso do ar condicionado diariamente	10	h	definido a partir do tempo de ocupação
Temperatura de <i>Setpoint</i>	24	°	RTQ-C (INSTITUTO..., 2018)
Tempo de uso da iluminação diariamente	10	h	definido a partir do tempo de ocupação
<i>Setpoint</i> da iluminação	300	Lux	NBR 5413 (ASSOCIAÇÃO..., 1992)

Tabela 9 - Fatores constantes nos experimentos.

(conclusão)

Fator	Valor	Unidade	Fonte
Percentual de lâmpadas dimerizadas	50	%	Definido pelo autor
Cronograma de uso de equipamentos	variável	-	Biblioteca do Energy Plus
Cronograma de infiltração de ar	variável	-	Biblioteca do Energy Plus

Fonte: elaborado pelo autor (2019).

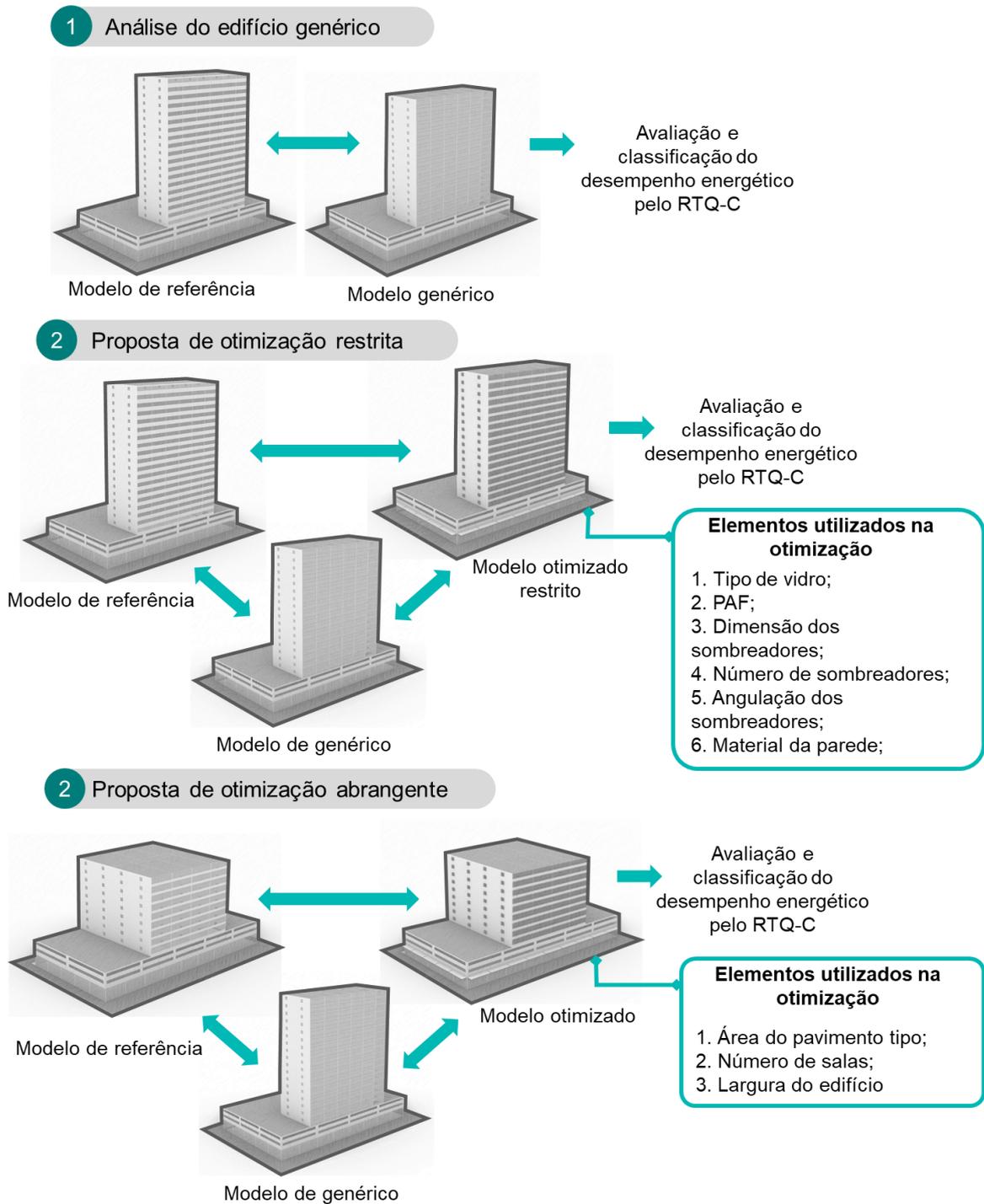
Quadro 5 - Fatores de ruído nos experimentos.

Fator	tipo
Aspectos do sistema computacional	Erros inesperados durante a simulação
	Lentidão no processamento devido as configurações do computacionais
Aspectos externos	Queda no fornecimento de energia durante o procedimento

Fonte: elaborado pelo autor (2019).

; e 3) proposta de otimização abrangente, em que os aspectos da geometria como dimensão, número de pavimentos, quantidade de salas são alterados com a manutenção das configurações “ótimas” obtidas no teste anterior. Essa última etapa propiciou a verificação de um conjunto mais amplo de possibilidades de projeto de acordo com o lote e as delimitações impostas pelos índices urbanísticos. Vale enfatizar que este experimento surgiu não somente da curiosidade para a exploração de soluções, mas também pela facilidade e autonomia na qual o sistema generativo e a modelagem paramétrica permitiram para a criação de novas configurações. A sequência e descrição dos experimentos estão ilustrados na Figura 31.

Figura 31 - Planejamento de experimentos.



Fonte: elaborado pelo autor (2019).

3.4 ETAPA 4: SISTEMATIZAÇÃO DOS DADOS

3.4.1 Análise de sensibilidade

A análise de sensibilidade foi desenvolvida a fim de identificar os parâmetros com maior influência no consumo de energia elétrica na modelagem computacional das edificações, uma vez que as variáveis são alteradas de forma conjunta e aleatória no processo de otimização. Assim sendo, utilizou-se técnicas estatísticas para a elaboração de um modelo linear generalizado com distribuição gama (Equação 5), ideal para o tratamento de dados assimétrico, como é o caso desta pesquisa (PAULA, 2013). Para obter a contagem estimada pelo modelo foi preciso aplicar uma função inversa à função de ligação, a qual é descrita na Equação 6. Outros cálculos que auxiliaram a compor o estudo, como o desvio padrão amostral e erro padrão são descritos na Equação 7 e 8 respectivamente. Deve-se salientar que o *software* R (versão 3.4.3) foi utilizado para as análises, confecção dos gráficos e tabelas.

$$\log(\mu_i) = \mathbf{x}_i^T \beta + \ln 2\phi^{-1} \quad (\text{Equação 5})$$

Fonte: adaptado de Paula (2013).

$$e^{\log(\mu)} \quad (\text{Equação 6})$$

Fonte: adaptado de Paula (2013).

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n - 1}} \quad (\text{Equação 7})$$

Fonte: adaptado de Paula (2013).

Onde:

X_i = i-ésima observação da amostra

\bar{X} = média amostral

n = tamanho da amostra

$$ep = \frac{S}{\sqrt{n}}$$

(Equação 8)

Fonte: adaptado de Paula (2013).

Onde:

S = desvio padrão amostral

n = tamanho da amostra

3.4.2 Organização do método de projeto

Para delimitar de forma clara o método de projeto performativo proposto, foram definidas diretrizes a partir dos resultados obtidos nos procedimentos experimentais. As informações foram compiladas em um quadro a fim de direcionar a execução correta da metodologia proposta. Em paralelo, produziu-se um fluxograma que demonstra as respectivas as etapas das sequências de decisões do processo de projeto, como também as metodologias usadas em cada fase, apresentado no capítulo 4.5.

4 RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados os resultados dos procedimentos experimentais desenvolvidos como base para elaboração da proposta do método de projeto performativo. A sequência estabelecida visa não somente manter um encadeamento lógico quanto aos procedimentos metodológicos, mas também tem como função explicitar as potencialidades e os desafios da implementação das técnicas de projeto digital na concepção de edifícios energeticamente eficientes. Ressalta-se, mais uma vez, que mesmo diante de toda a contribuição das ferramentas computacionais, é necessário, acima de tudo, o conhecimento técnico dos projetistas tanto para a elaboração como para a interpretação das diversas tarefas a fim de que se tomem decisões acertadas e coerentes ante a particularidade de cada projeto.

4.1 O SISTEMA GENERATIVO DE PROJETO

As relações topológicas e a estrutura conceitual do projeto definida pelo cruzamento de parâmetros bem como sua inter-relação com os objetivos são os principais aspectos que caracterizam o algoritmo de um sistema generativo. À vista disso, o esquema proposto no subcapítulo 3.2.7 configurou-se de forma adequada para a aplicação dos estudos desenvolvidos nesta pesquisa, levando em consideração as características do *software Rhinoceros* e seu editor de algoritmos *Grasshopper*. Pode-se afirmar que essa mesma estrutura algorítmica, se aplicada em outras plataformas de desenvolvimento, podem alcançar resultados semelhantes pois suas premissas indicam as relações gerais entre os elementos constitutivos do projeto e não meramente aspectos referentes a singularidade da ferramenta. Portanto, a fim de apresentar o código de programação com o detalhamento de sua composição e de evitar uma abordagem demasiadamente extensa, os resultados deste tópico se encontram descritos no APÊNDICE F.

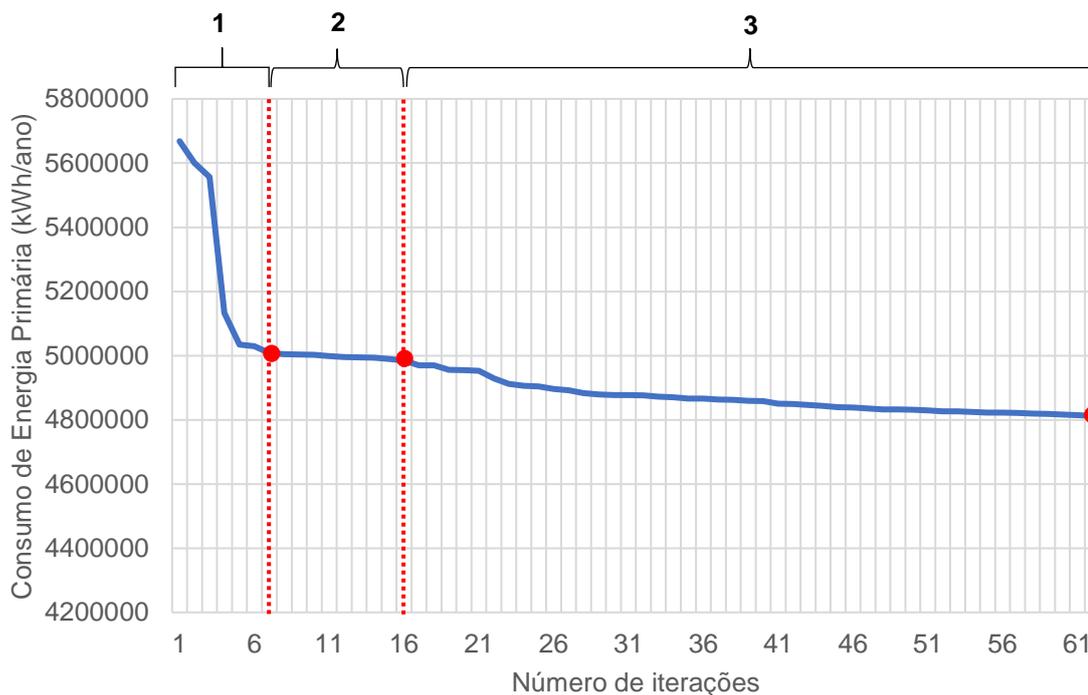
4.2 OTIMIZAÇÃO

A respeito da otimização, pode-se destacar que desempenhou um papel fundamental na qualidade e velocidade na obtenção de possíveis soluções de projeto. De acordo

com o estabelecido, os procedimentos foram adaptados mediante duas perspectivas: 1) proposta de otimização restrita; e 2) proposta de otimização abrangente. No primeiro cenário foram correlacionadas seis variáveis, as quais corresponderam a um conjunto de 62 iterações para a formação da referida modelagem computacional da edificação. No entanto, tendo em conta o critério de estagnação do processo, o qual admite um número de 20 iterações sem a adição de melhorias no valor do objetivo (correspondente ao CEP), é possível assegurar a realização de 82 verificações. Neste contexto, faz-se necessário salientar que, além disso, a tendência de simplificação da modelagem corroborou para que as simulações de desempenho energético consumissem em média 8 minutos para sua realização. Assim sendo, a primeira fase do experimento foi compilada em aproximadamente 8h30.

Em relação a convergência do algoritmo RBFOpt utilizado pela ferramenta *Opossum* durante a execução da otimização, foi notório um progresso dos resultados em três fases distintas. Na primeira há uma queda brusca no valor do CEP, com uma diminuição de aproximadamente 660.000 kWh/ano em relação a primeira iteração, em apenas 1h, conforme destaca a Figura 32. Por outro lado, na segunda fase, verifica-se uma estabilidade até a 16ª iteração de onde se inicia um declínio progressivo até estagnação do processo e a obtenção do resultado. De modo geral, a otimização possibilitou uma combinação de parâmetros capazes de minimizar em até 856.000 kWh/ano, o que representa uma melhoria de 15% dentre as possíveis configurações abarcadas nas variáveis utilizadas na otimização restrita. Em acréscimo, conclui-se também que a primeira hora de otimização equivale a 80% dos avanços atrelados à diminuição do consumo de energia elétrica no projeto.

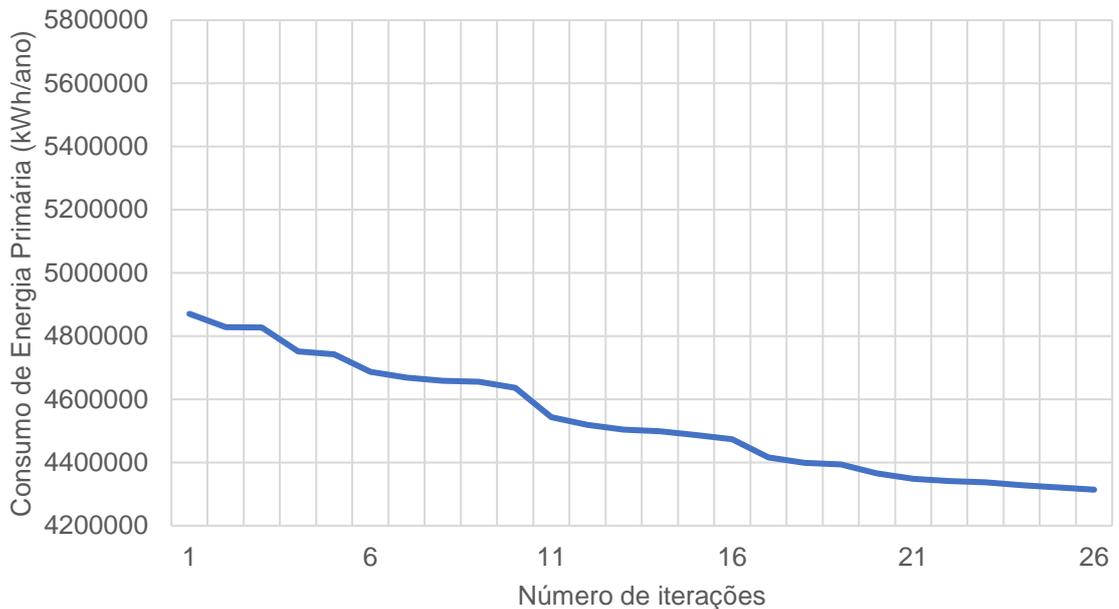
Figura 32 – Monitoramento de convergência da proposta de otimização restrita.



Fonte: elaborado pelo autor (2019).

Já no que diz respeito a proposta de otimização abrangente, tanto o número de iterações como o tempo dispendido no processo foram menores. Nesse caso, o objetivo foi verificar apenas os impactos relacionados a variação da forma e a configuração dos ambientes internos no consumo de energia na edificação. Como resultado, foram desenvolvidas 26 iterações (excluindo as correspondentes ao critério de estagnação), com a duração de 3h30 de processamento. Diferente da restrita, a otimização abrangente assumiu um caráter único de decréscimo, sem mudanças abruptas ou estabilizações momentâneas (Figura 33). Em relação a sua configuração inicial (primeira iteração), foi obtida uma melhoria de 12% no CEP, o que corresponde a economia de 615.500 kWh/ano. Em contrapartida, analisando globalmente todas as possibilidades de otimização no conjunto de variáveis pertinente aos experimentos elaborados, tendo em vista o pior resultado da configuração do edifício de otimização restrita e o melhor do abrangente, o percentual de melhoria passa a corresponder a 24%, ou seja, uma redução de 1.354.100 kWh/ano.

Figura 33 – Monitoramento de convergência da proposta de otimização abrangente.



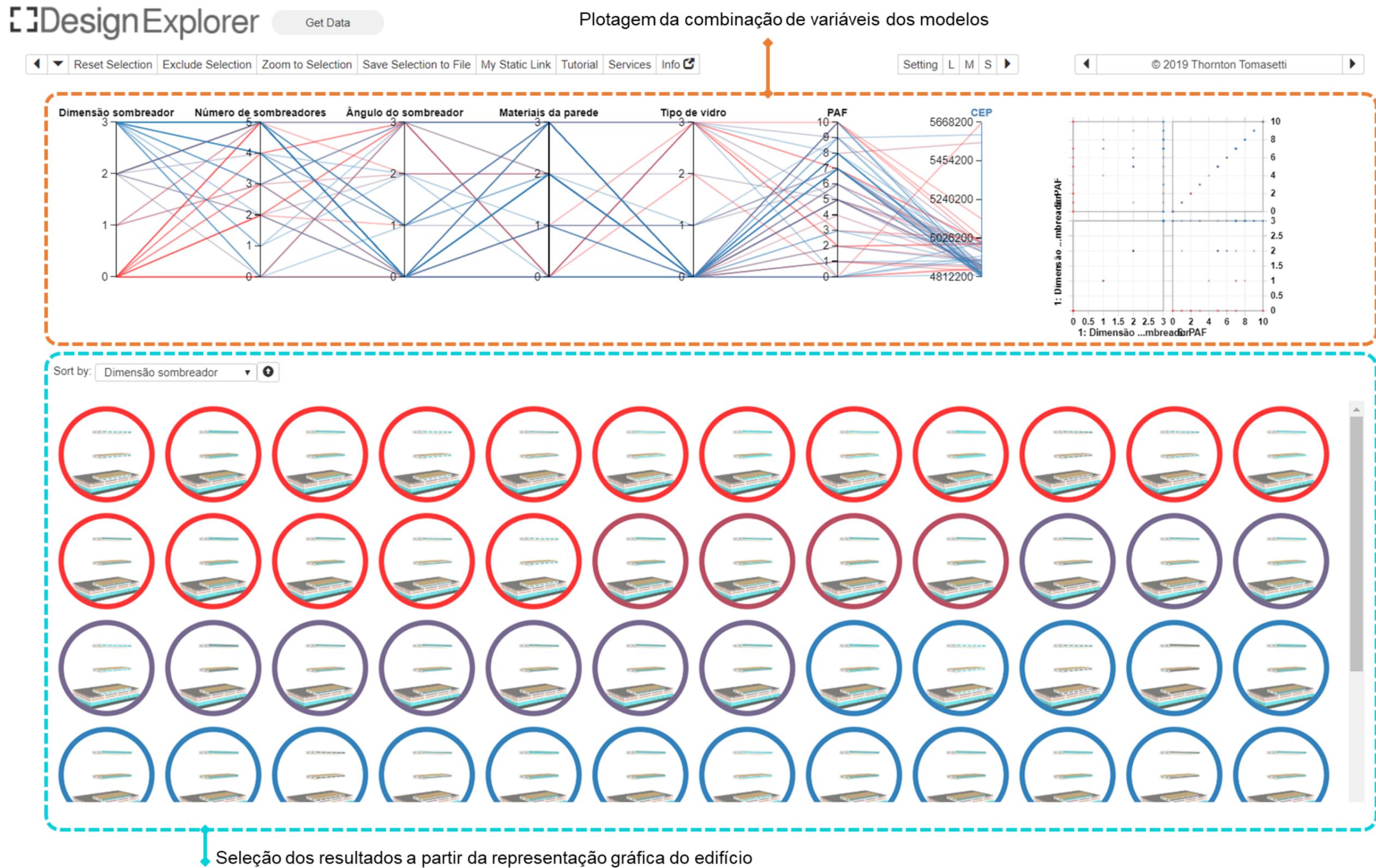
Fonte: elaborado pelo autor (2019).

Portanto, diante desse quadro, a escolha do *Opossum* como ferramenta de trabalho se ratificou pela eficiência de seu algoritmo (RBFOpt) na convergência do objetivo de otimização, assim como também foi capaz de reforçar seus atributos, enfatizados por Wortmann (2018), na resolução de problemas específicos, como os relacionados a eficiência energética. A título de comparação, caso fossem realizados todos os cruzamentos possíveis dentro do conjunto de variáveis, seria necessário para o edifício de otimização restrita, por exemplo, realizar 16.896 iterações, as quais só seriam finalizadas após 93 dias, utilizando-se 8 minutos como tempo base para cada simulação. Sendo assim, as ferramentas computacionais demonstram ser recomendáveis para problemas de alta complexidade associados a uma curta disponibilidade de tempo, pois são capazes de auxiliar os projetistas num processo rápido e eficaz de tomada de decisões.

Embora possua diversas vantagens, o *Opossum*, assim como outras ferramentas de otimização possuem duas principais fragilidades em sua interface: 1) carência (ou inexistência) de compatibilização direta com softwares de armazenamento e tratamento de dados como o Excel; e 2) impossibilidade de interação ou escolha de resultados por critérios estéticos. O *TT Toolbox* e o *Design Explorer*, por sua vez, foram capazes de suprir essas demandas, as quais são essenciais na prática

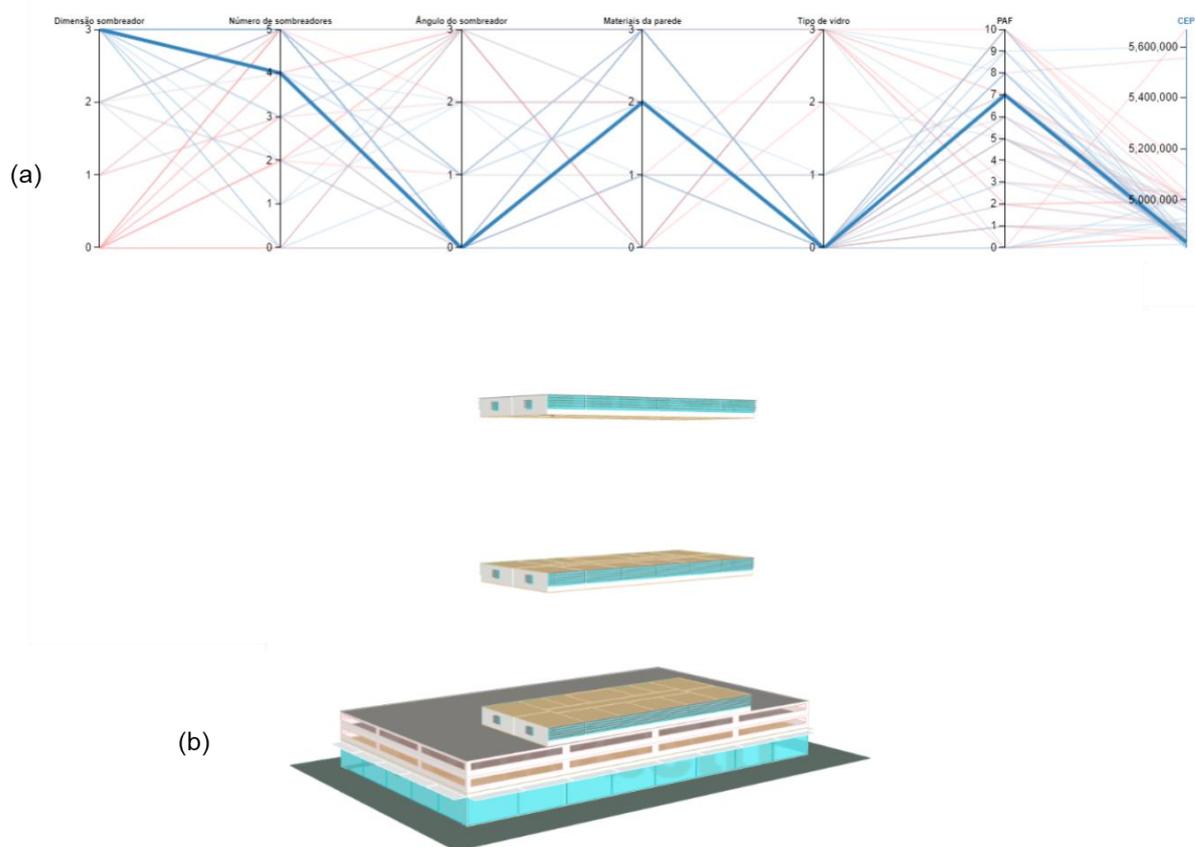
projetual, uma vez que tanto a arquitetura como a engenharia lidam não somente com aspectos quantitativos, mas também com critérios estéticos. A Figura 34 ilustra as possibilidades de interação na plataforma do Design Explorer, enquanto as Figuras 35 e 36 apresentam os resultados obtidos para o edifício de otimização restrita e abrangente, respectivamente.

Figura 34 – Interface e possibilidades de tratamento de dados no *Design Explorer*.



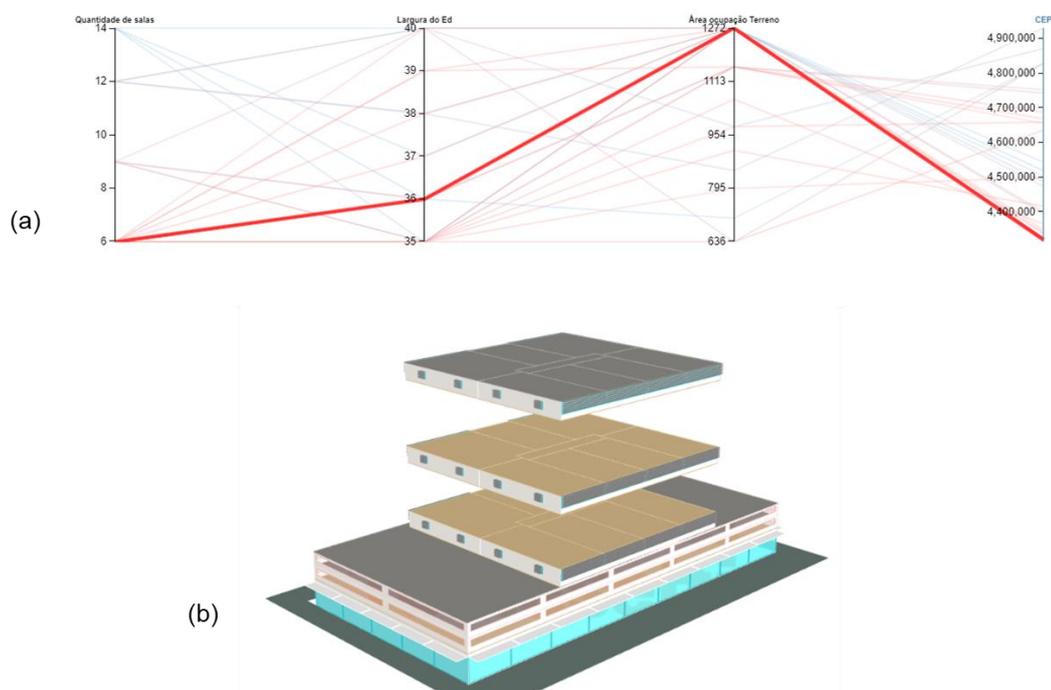
Fonte: adaptado da ferramenta Design Explorer (2019).

Figura 35 – (a) plotagem das combinações das variáveis da proposta de otimização restrita, com destaque em azul para a que obteve o melhor desempenho; (b) representação gráfica do edifício correspondente.



Fonte: elaborado pelo autor (2019).

Figura 36 – (a) plotagem das combinações das variáveis da proposta de otimização abrangente, com destaque em azul para a que obteve o melhor desempenho; (b) representação gráfica do edifício correspondente.

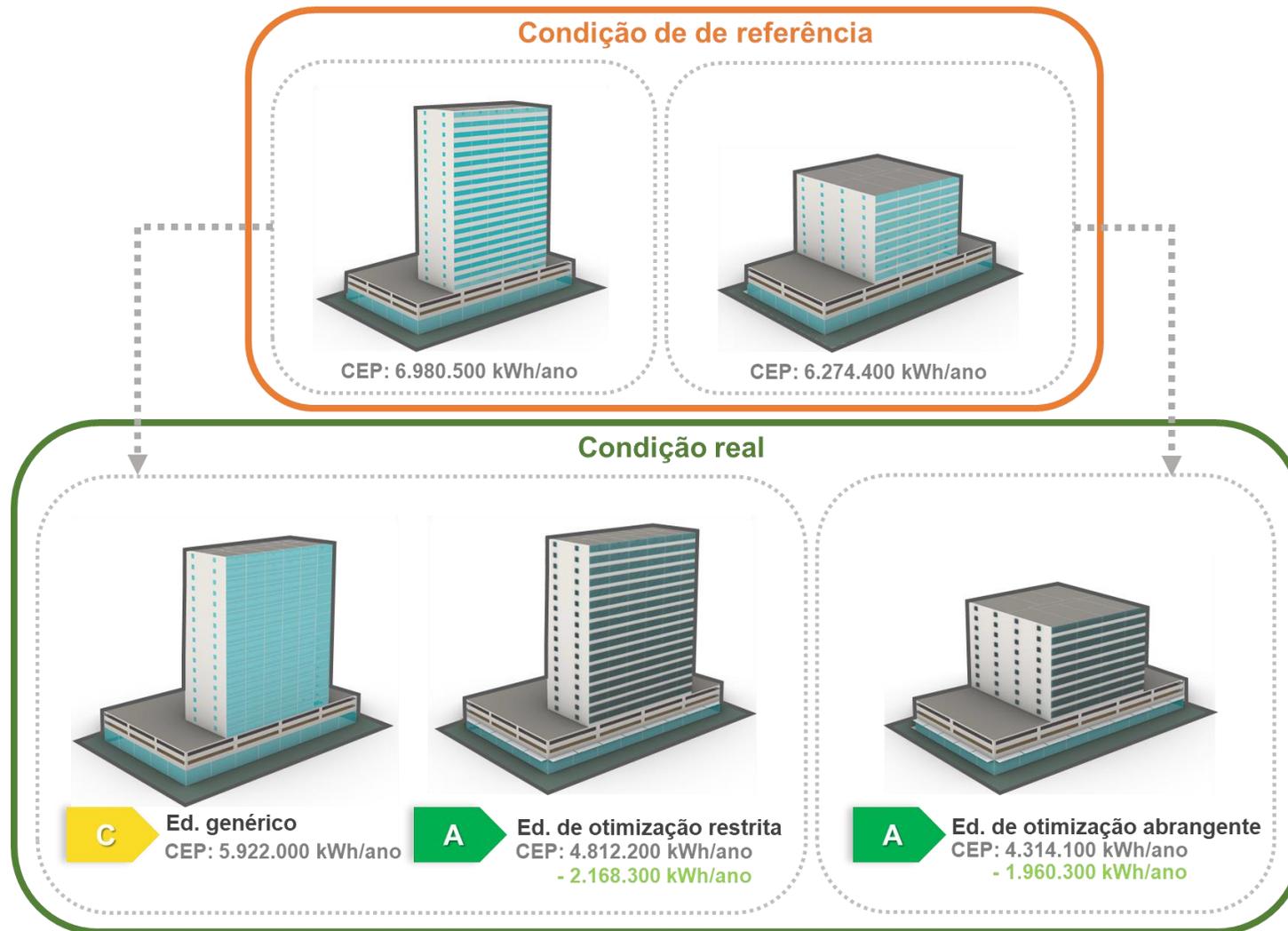


Fonte: elaborado pelo autor (2019).

4.3 DESEMPENHO ENERGÉTICO DOS EDIFÍCIOS

Conforme os procedimentos referidos na metodologia (subcapítulo 3.3.3), todas as modelagens das edificações foram avaliadas e classificadas segundo os requisitos do RTQ-C referente a etiquetagem geral das edificações (BRASIL., 2018). Para a organização dos dados, os resultados foram apresentados a partir das definições do planejamento de experimentos, dos quais se destacam: 1) análise do edifício genérico, que define o desempenho energético do edifício genérico; 2) proposta de otimização restrita, a qual verifica a eficiência energética ante as modificações pontuais nos elementos arquitetônicos; e 3) proposta de otimização abrangente, que lida com aspectos formais e a configuração do ambiente interno. Sendo assim, as etiquetas de classificação do nível de eficiência energética das referidas edificações bem como seus respectivos valores do CEP estão ilustradas na Figura 37. As Tabelas com as variáveis utilizadas para os cálculos, por sua vez, estão detalhadas no Apêndice G

Figura 37 – Consumo de energia primária e classificação do nível de eficiência energética dos edifícios em suas respectivas condições.



Fonte: elaborado pelo autor (2019).

No primeiro caso, referente a análise da condição real, por meio do edifício genérico, constatou-se que, em média, as edificações elaboradas dentro do recorte temporal e territorial, obtidos no levantamento, possuem um nível intermediário de eficiência energética. Por outro lado, na proposta de otimização restrita, a alteração e a complementação de elementos arquitetônicos no edifício possibilitaram um avanço de 31% na economia relativa ao CEP em comparação a sua respectiva condição de referência e 19% em detrimento ao edifício genérico. Já a proposta de otimização abrangente, devido a sua exploração e variação na composição da forma, viabilizou um incremento de 27% na redução do consumo de energia primária em relação ao modelo genérico e 31% no que diz respeito a sua condição de referência. Desse modo, em ambos os casos os testes obtiveram êxito no sistema de etiquetagem, passando da classificação pertencente ao nível C para o nível A.

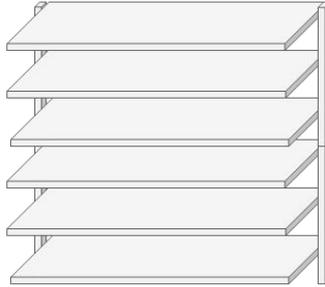
Esses resultados evidenciam que, de certa forma, aspectos básicos para um bom desempenho dos edifícios são muitas vezes ignorados ou até mesmo esquecidos pelos projetistas durante o processo de concepção do projeto. A consideração dos fatores climáticos, por exemplo, é fundamental no processo de tomada de decisões para a conformação de uma proposta projetual. No entanto, o viés desta pesquisa enfatizou não apenas a importância das decisões, mas também como a combinação delas podem influenciar diretamente os objetivos do projeto. Em muitos casos, os elementos que podem auxiliar na eficiência energética das edificações apresentam características com condições conflitantes, como é o caso do tamanho das janelas que pode afetar, além da iluminação, o consumo de ar condicionado devido a transmissão de calor pela radiação solar. Portanto, nos experimentos executados, a técnica de otimização favoreceu a resolução de problemas conflitantes proporcionando uma combinação de elementos e materiais mais adequados diante das alternativas estudadas, assim como ilustra a Figura 38.

Figura 38 – Resultado das combinações obtidas por meio da otimização.

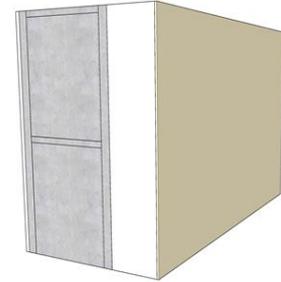
1 Proposta de otimização restrita



Tipo de vidro: Vidro simples
PAF: 65%

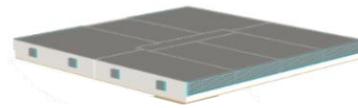


Sombreadores
Dimensão: 40 cm
Número: 6
Angulação: 0°



Material de composição da parede: bloco de concreto com isolamento térmico

2 Proposta de otimização abrangente



Área do pavimento tipo: 1.272 m²
Largura do edifício: 35 m
Número de salas: 6

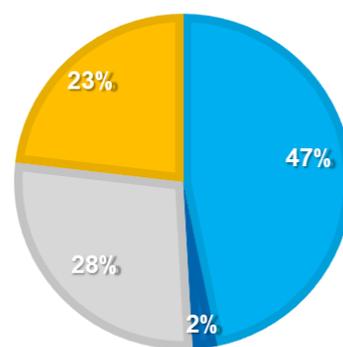
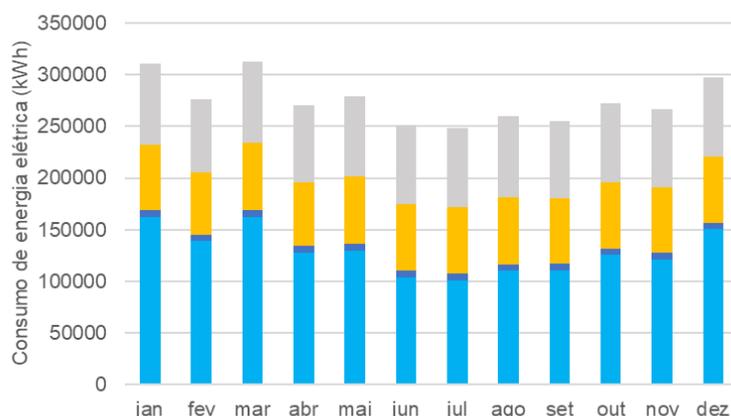
Fonte: elaborado pelo autor (2019).

A fim de compreender mais detalhadamente os impactos da proposta de otimização restrita foi analisada a representatividade dos sistemas de resfriamento, *fans* (ventiladores responsáveis transportar o ar frio para os ambientes), iluminação e equipamentos no consumo total de energia elétrica. Na Figura 39, observa-se uma diminuição da representatividade do sistema de resfriamento e o aumento no consumo dos *fans*. Isso se deve principalmente a modificação do tipo de ar condicionado. No edifício otimizado o VRF exerce de forma mais criteriosa o controle da temperatura conforme a exigência por resfriamento de cada ambiente, ao contrário do VAV usado na condição de referência. Sendo assim, devido a variabilidade de demanda há uma maior necessidade de diferenciação do fluxo de ar frio, o que exige uma maior precisão dos *fans*. Entretanto, outros fatores como os materiais de composição das paredes, tipo de vidro e a inserção de sombreadores também se

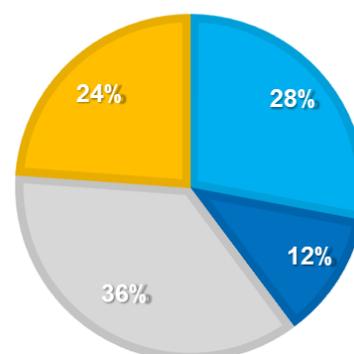
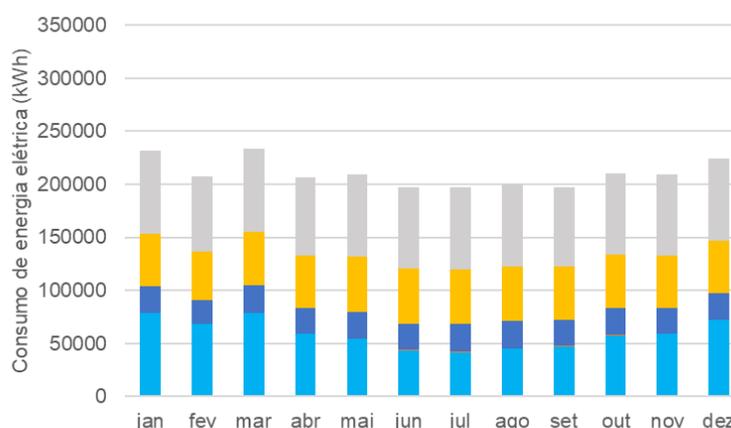
relacionam diretamente com a redução da carga térmica e a consequente diminuição da demanda por resfriamento.

Figura 39 – Consumo mensal e total de energia elétrica por sistema na de otimização restrita e sua respectiva condição de referência.

Edifício de referência



Edifício referente a proposta de otimização restrita



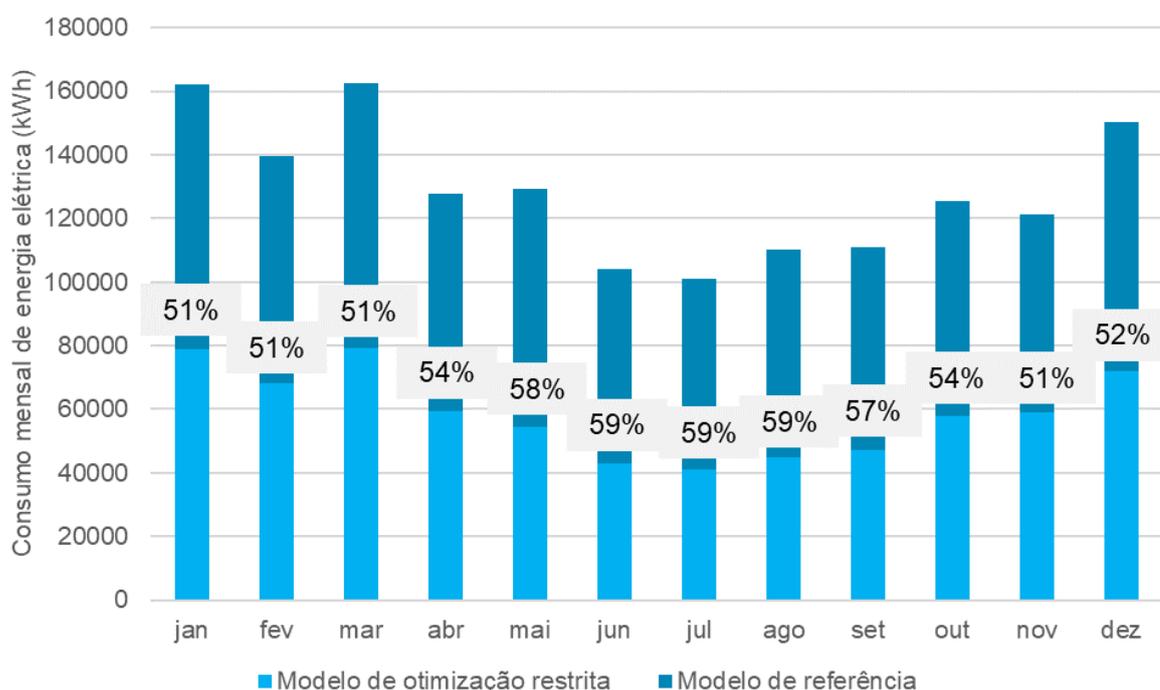
■ Resfriamento ■ Aquecimento ■ Fans ■ Iluminação ■ Equipamentos

Fonte: elaborado pelo autor (2019).

Outro ponto relevante é uma frequência de variação de consumo mais visível do sistema de resfriamento ao longo dos meses do ano em detrimento a maior estabilidade dos demais. Esse aspecto revela uma maior sensibilidade quanto as variações climáticas durante as estações do ano. Nessa perspectiva, embora a fachada principal do edifício receba uma incidência solar direta no verão, as modificações realizadas por meio da otimização possibilitaram uma economia de 51% durante esse período. Em outras épocas a média de redução de consumo de energia elétrica chegou a 58% como mostra o Gráfico 1. Apesar de não sofrer alterações tão

notáveis, a iluminação artificial foi capaz de gerar uma economia anual de 21%. Desse modo, tanto o aumento da proporção das janelas bem como a utilização de dimerizadores e sombreadores corroboram de forma positiva para uma melhor eficiência do sistema nos meses com incidência de insolação indireta e direta, respectivamente.

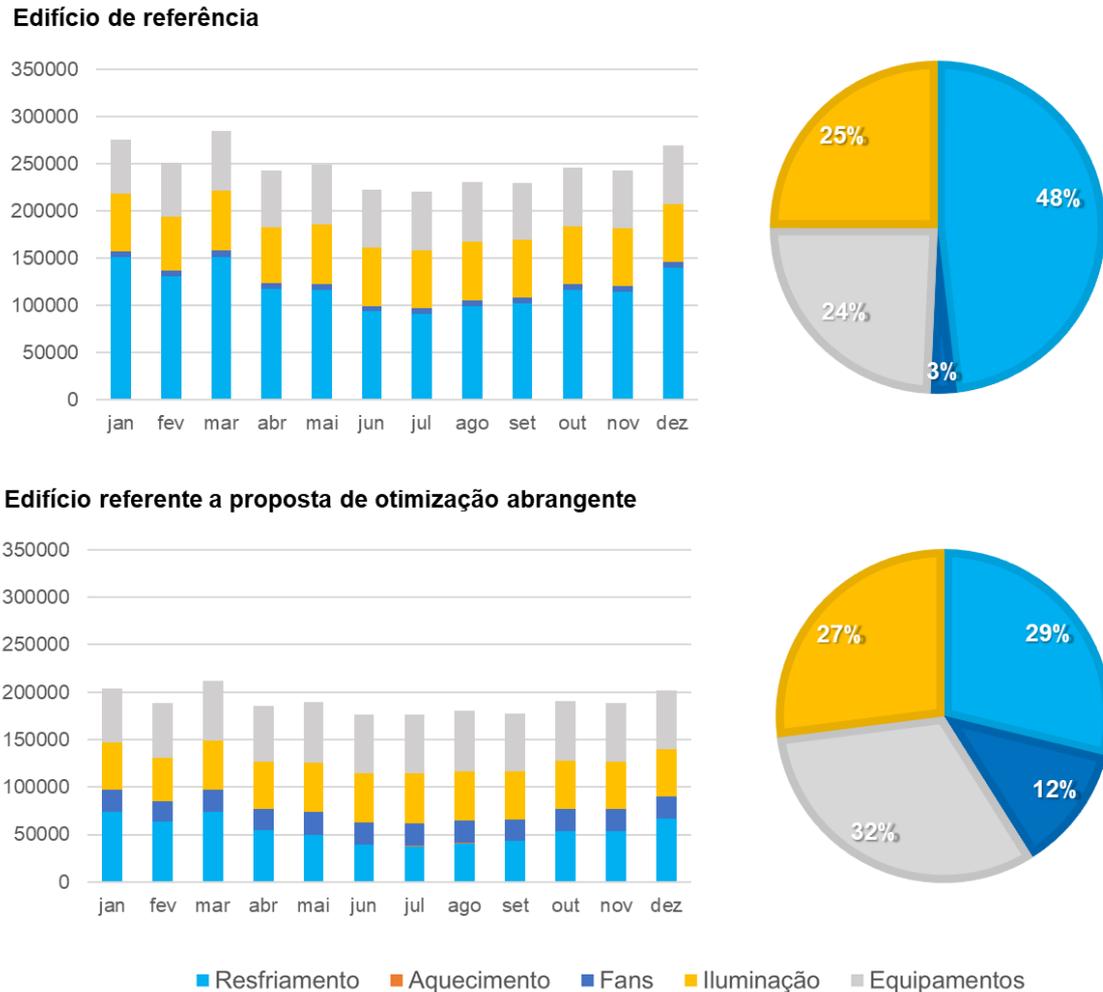
Gráfico 1 - Consumo de energia elétrica do sistema de resfriamento na modelagem de otimização restrita.



Fonte: elaborado pelo autor (2019).

Por outro lado, ainda que a proposta de otimização abrangente apresente características semelhantes à otimização restrita (Figura 40), é necessário abordar algumas particularidades que a distingue. Inicialmente, a alteração da área referente a torre do edifício e a consequente diminuição no número de pavimentos reduziu a superfície de incidência de radiação solar. Esse aspecto levou a economia de aproximadamente 8% do consumo relativo ao resfriamento. Em contrapartida, a subtração do número de salas no pavimento tipo e o aumento nas dimensões da largura do edifício proporcionou um pequeno acréscimo de 7.348 kWh/ano no sistema de iluminação artificial.

Figura 40 - Consumo mensal e total de energia elétrica por sistema no edifício de otimização abrangente e sua respectiva condição de referência.



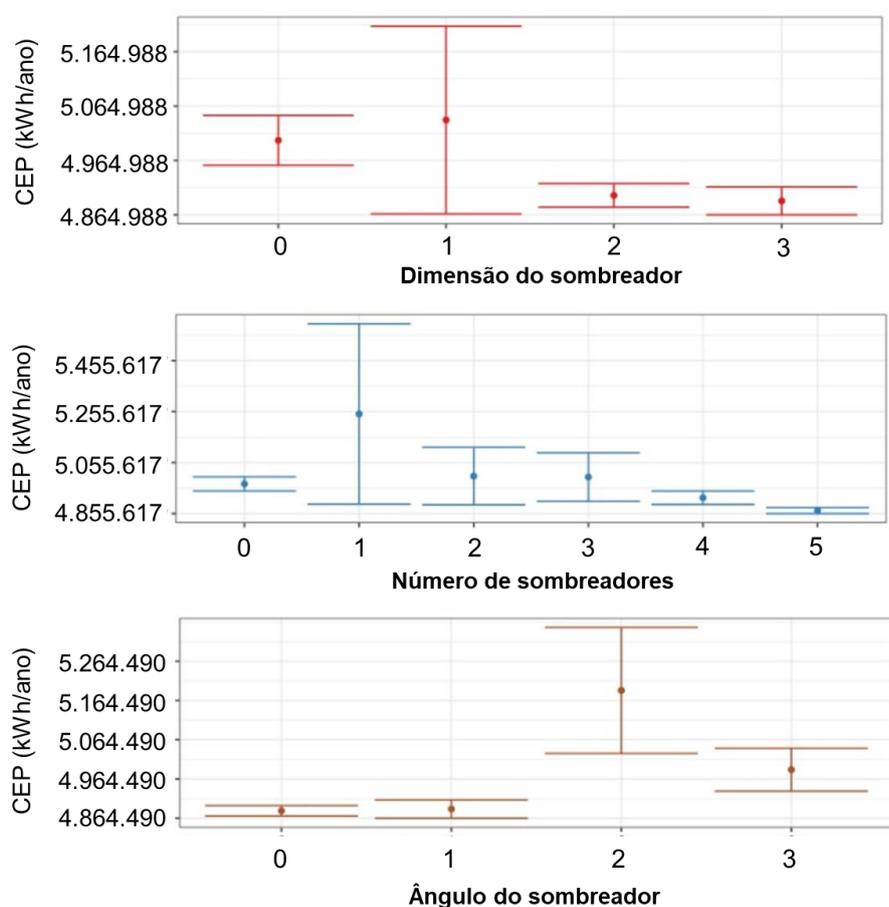
Fonte: elaborado pelo autor (2019).

4.4 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

Devido as particularidades da otimização, que conta com a alteração simultânea e imprevisível das variáveis, foi necessário partir para uma análise mais detalhada dos resultados relacionados ao desempenho energético dos modelagem computacional dos edifícios. Na proposta de otimização restrita, a média do consumo de energia primária assim como o desvio padrão dos parâmetros de cada variável foram agrupadas a fim de verificar seus respectivos impactos conforme destacam as Figura 41e 42. No que diz respeito às características dos sombreadores, pode-se destacar três aspectos: 1) a angulação maior do que 10% afeta negativamente o consumo de energia; 2) a influência da dimensão passa a ser pouco significativa após os 30 cm; e

3) a combinação de sombreadores, em geral, permite um melhor desempenho. Já em relação as janelas (PAF e tipo de vidro), há uma ampla variabilidade e incerteza associada ao tamanho da amostra fornecida pela otimização, o que pode denotar também, em certa medida, a dependência dessas variáveis quanto à combinação com outros elementos arquitetônicos para o seu bom desempenho. Por fim, as composições das paredes apresentaram uma melhor eficiência quando integradas com materiais de isolamento térmico.

Figura 41 – Gráficos com a plotagem das variáveis relacionadas ao sombreadores na otimização restrita e seus efeitos no consumo de energia primária.

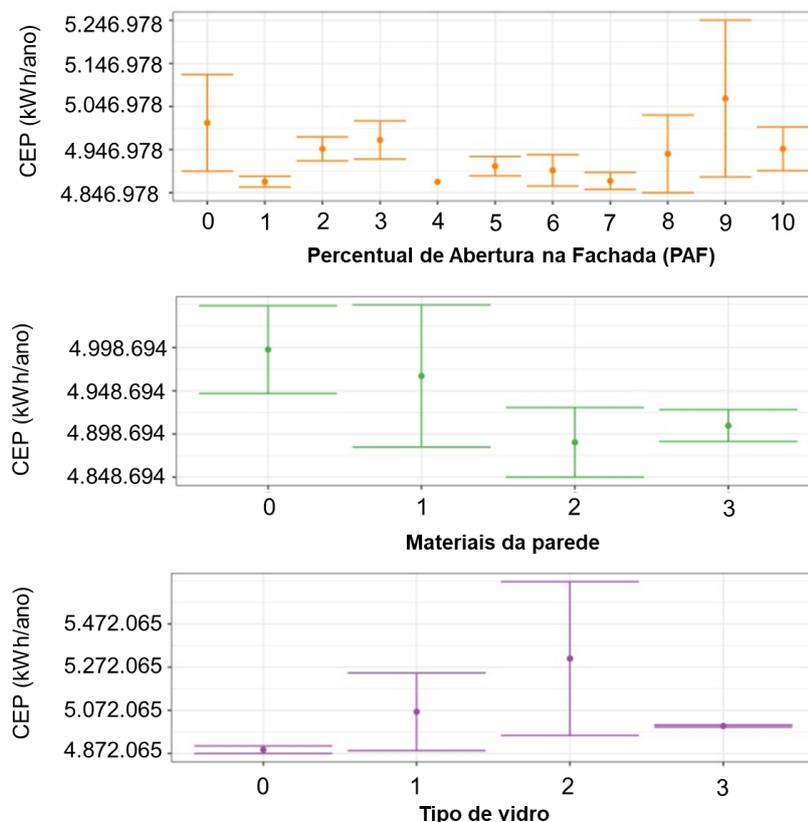


Legenda:

Variável	Unidade	Parâmetros					
		0	1	2	3	4	5
Dimensão	cm	10	20	30	40	-	-
Número	-	1	2	3	4	5	6
Ângulo	°	0	10	20	30	-	-

Fonte: elaborado pelo autor (2019).

Figura 42 - Gráficos com a plotagem das variáveis relacionadas as aberturas, materiais e vidros na de otimização abrangente e seus efeitos no consumo de energia primária



Legenda:

Variável	Unidade	Parâmetros										
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
PAF	%	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80
Materiais	W/(m²/K)	Bloco cerâmico	Bloco cerâmico com isolamento	Bloco de concreto	Bloco de concreto com isolamento	-	-	-	-	-	-	-
Vidro	-	Vidro simples	Vidro duplo	Vidro duplo 2	Vidro triplo	-	-	-	-	-	-	-

Fonte: elaborado pelo autor (2019).

Para mensurar a influência de cada parâmetro na proposta de otimização restrita, foi gerada uma estimativa dos efeitos do modelo relacionando seu acréscimo ou decréscimo associado ao CEP (Tabela 10). Para balizar a comparação, utilizou-se o parâmetro 0 de cada variável. Desta forma, foi possível verificar que os fatores que obtiveram uma maior significância estatística foram o tipo de vidro, o PAF e o ângulo do sombreador considerando o P-valor $\leq 0,05$ devido ao intervalo de confiança de 95%. Em relação aos efeitos dos parâmetros no consumo de energia primária, pode-se destacar que as composições em que foram adotados o tipo de vidro 1 (vidro duplo) e o ângulo de sombreador de 30 °C apresentaram um aumento médio de 6,79% e

3,66% no CEP, respectivamente, conforme ressalta a Tabela 11. Em contrapartida, no caso do percentual de abertura da fachada as composições proporcionaram um decréscimo no consumo de energia primária em aproximadamente 4,85%, 5,93% e 2,64%.

Tabela 10 - Estimativa dos efeitos dos parâmetros na otimização restrita.

Variável	Valor Estimado	Erro Padrão	Valor T	P-valor
Intercepto	15,4555814	0,0187627	823,739	< 0,0001
Dimensão Sombreador: 1	0,0134478	0,0224466	0,599	0,55308
Dimensão Sombreador: 2	-0,0127749	0,0124728	-1,024	0,31296
Dimensão Sombreador: 3	-0,0200740	0,0115735	-1,734	0,09189
Número de sombreadores: 1	0,0369437	0,0258406	1,430	0,16193
Número de sombreadores: 2	-0,0264846	0,0171089	-1,548	0,13088
Número de sombreadores: 3	0,0090309	0,0167291	0,540	0,59283
Número de sombreadores: 4	-0,0118127	0,0135470	-0,872	0,38934
Número de sombreadores: 5	-0,0166098	0,0113604	-1,462	0,15290
Ângulo do sombreador: 1	0,0085252	0,0112062	0,761	0,45205
Ângulo do sombreador: 2	0,0359097	0,0167152	2,148	0,03890
Ângulo do sombreador: 3	0,0014353	0,0099796	0,144	0,88649
Materiais da parede: 1	-0,0100168	0,0132545	-0,756	0,45502
Materiais da parede: 2	-0,0179335	0,0103855	-1,727	0,09328
Materiais da parede: 3	-0,0143217	0,0102374	-1,399	0,17088
Tipo de vidro: 1	0,0116350	0,0163312	0,712	0,48105
Tipo de vidro: 2	0,0656871	0,0230018	2,856	0,00727
Tipo de vidro: 3	0,0055398	0,0115679	0,479	0,63508
PAF: 1	-0,0497644	0,0222886	-2,233	0,03226
PAF: 2	-0,0225868	0,0193242	-1,169	0,25060
PAF: 3	-0,0280902	0,0218561	-1,285	0,20740
PAF: 4	-0,0611114	0,0351867	-1,737	0,09148
PAF: 5	-0,0267515	0,0168368	-1,589	0,12135
PAF: 6	-0,0184823	0,0194530	-0,950	0,34877
PAF: 7	-0,0265602	0,0148504	-1,789	0,08261
PAF: 8	-0,0122170	0,0168393	-0,726	0,47311
PAF: 9	-0,0006303	0,0194592	-0,032	0,97435
PAF: 10	-0,0156493	0,0179220	-0,873	0,38869

Fonte: elaborado pelo autor (2019).

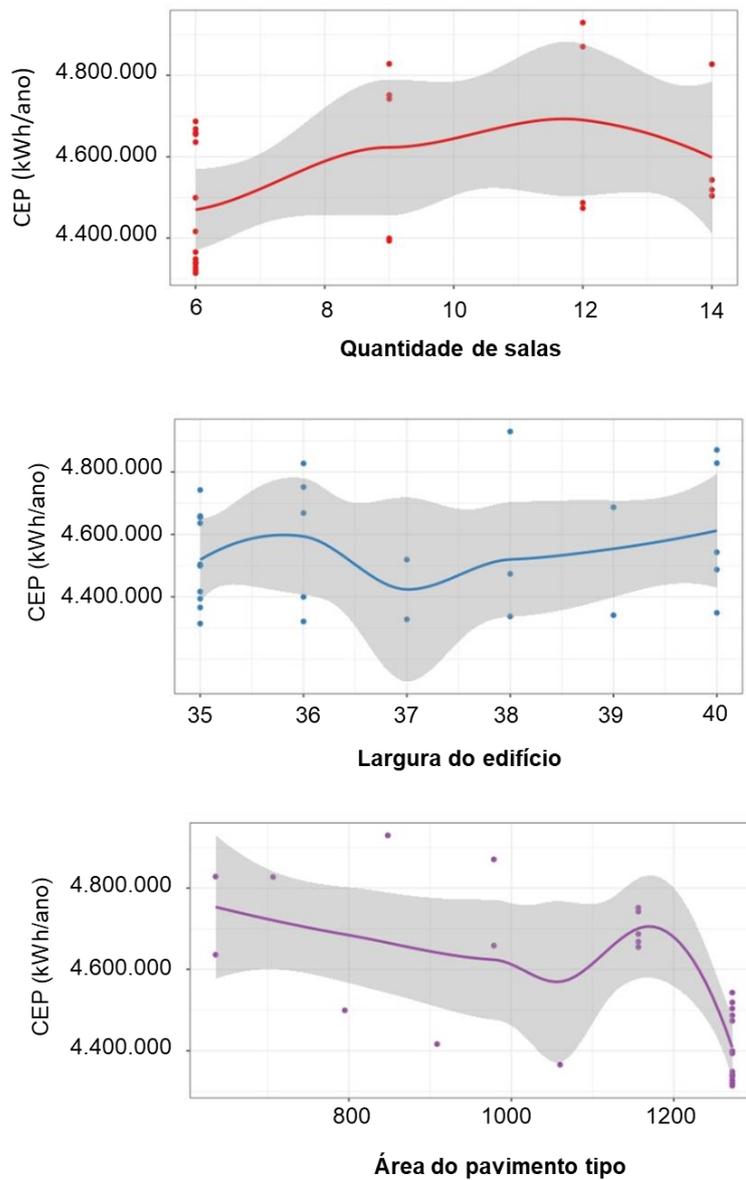
Tabela 11 - Estimativa dos efeitos dos parâmetros de otimização restrita no CEP.

Variável	Valor Estimado	Limite Inferior	Limite Superior
Dimensão Sombreador: 1	1,35%	-3,01%	5,93%
Dimensão Sombreador: 2	-1,27%	-3,65%	1,17%
Dimensão Sombreador: 3	-1,99%	-4,18%	0,26%
Número de sombreadores: 1	3,76%	-1,38%	9,20%
Número de sombreadores: 2	-2,61%	-5,82%	0,70%
Número de sombreadores: 3	0,91%	-2,36%	4,28%
Número de sombreadores: 4	-1,17%	-3,76%	1,49%
Número de sombreadores: 5	-1,65%	-3,82%	0,57%
Ângulo do sombreador: 1	0,86%	-1,33%	3,10%
Ângulo do sombreador: 2	3,66%	0,32%	7,11%
Ângulo do sombreador: 3	0,14%	-1,80%	2,12%
Materiais da parede: 1	-1,00%	-3,53%	1,61%
Materiais da parede: 2	-1,78%	-3,76%	0,24%
Materiais da parede: 3	-1,42%	-3,38%	0,58%
Tipo de vidro: 1	1,17%	-2,01%	4,47%
Tipo de vidro: 2	6,79%	2,12%	11,70%
Tipo de vidro: 3	0,56%	-1,70%	2,86%
PAF: 1	-4,85%	-8,92%	-0,61%
PAF: 2	-2,23%	-5,86%	1,54%
PAF: 3	-2,77%	-6,85%	1,49%
PAF: 4	-5,93%	-12,18%	0,80%
PAF: 5	-2,64%	-5,80%	0,63%
PAF: 6	-1,83%	-5,50%	1,99%
PAF: 7	-2,62%	-5,42%	0,25%
PAF: 8	-1,21%	-4,43%	2,11%
PAF: 9	-0,06%	-3,81%	3,84%
PAF: 10	-1,55%	-4,96%	1,97%

Fonte: elaborado pelo autor (2019).

Quanto a proposta de otimização abrangente, a presença de poucas variáveis facilitou a percepção da influência de cada parâmetro no desempenho energético do projeto. Desse modo, a partir das análises efetuadas nos resultados obtidos na distribuição gama, notou-se um impacto mais significativo quanto a área do pavimento tipo e a quantidade de salas que pode ser notado pelas linhas de tendência destacadas na Figura 43. Sendo assim, o modelo permitiu concluir que o aumento de uma sala levou a um acréscimo médio de 0,5% no CEP, enquanto o incremento de 100 m² de área possibilitou a redução de 1% no consumo de energia. A compila de todos os resultados da análise de sensibilidade se encontram na Figura 44.

Figura 43 – Gráficos de dispersão das variáveis na otimização abrangente e seus efeitos no consumo de energia primária.



Fonte: elaborado pelo autor (2019).

Figura 44 - Resumo dos resultados da análise de sensibilidade.

Proposta de otimização restrita

Sombreadores

- 1) Angulação maior que 10% afeta negativamente o CEP;
- 2) Dimensão pouco significativa a partir de 30 cm;
- 3) Combinação de sombreadores – melhor desempenho

As paredes mais eficientes possuem isolamento térmico

Angulação do Sombreador	Combinações com 30°, em geral, obtém acréscimo de 6,79% no CEP
PAFt	Combinações com 35%, em geral, reduzem 4,85% no CEP
Tipo de vidro	Combinações com vidro duplo, em geral, obtém acréscimo de 3,66% no CEP

Proposta de otimização abrangente

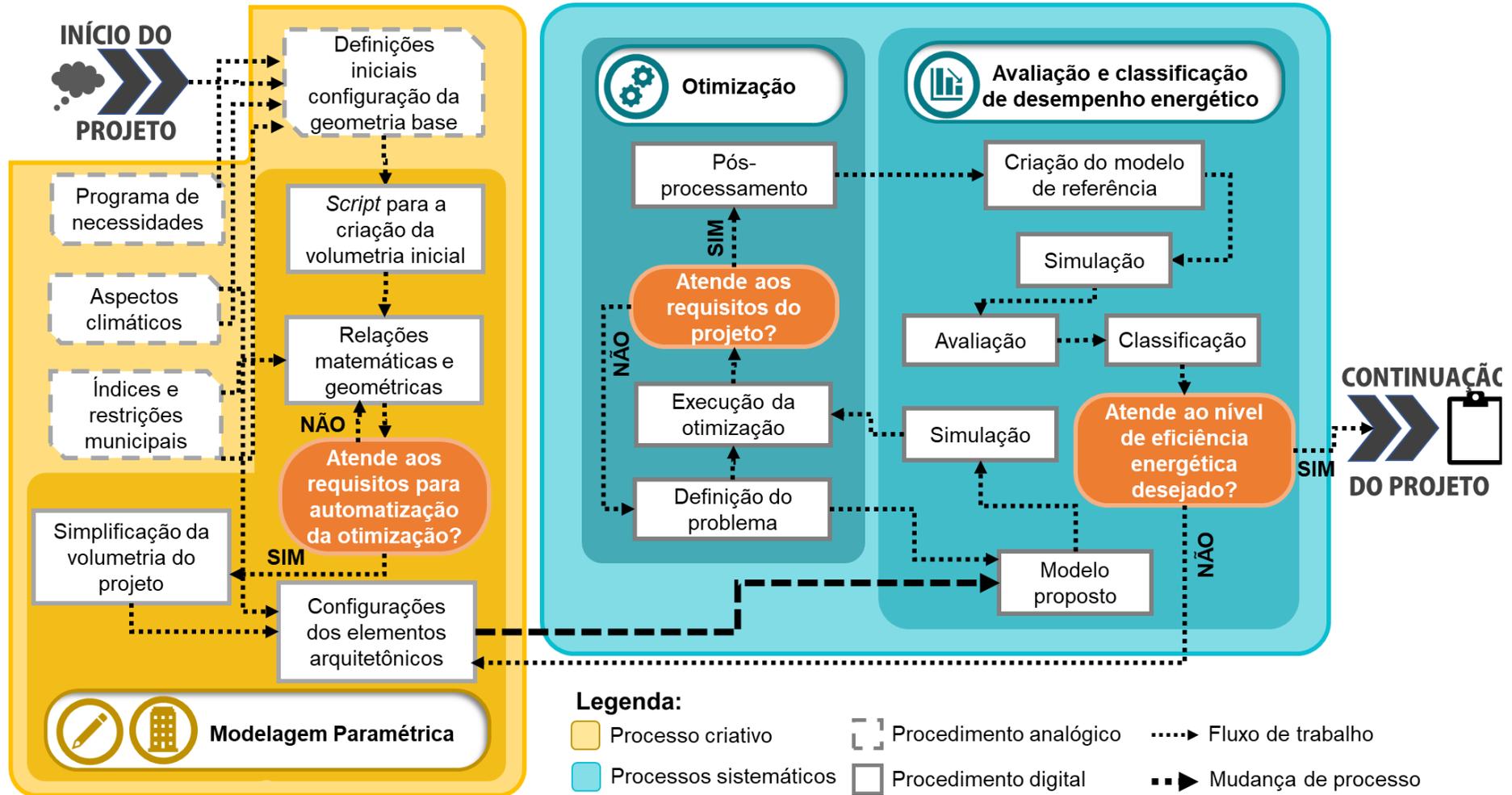
Número de salas	Aumento de 1 sala, em geral, obtém acréscimo de 0,5% no CEP
Dimensão do pav. tipo	Aumento do pav. tipo em 100m ² , em geral, reduz 1% no CEP

Fonte: elaborado pelo autor (2019).

4.5 PROPOSIÇÃO DO MÉTODO DE PROJETO PERFORMATIVO

Com base nos experimentos e análises efetuadas, foi possível verificar que as modelagens computacionais dos edifícios desenvolvidos obtiveram êxito tanto na melhoria da eficiência energética, bem como na implementação de técnicas de modelagem paramétrica e otimização. Desse modo, os procedimentos foram organizados esquematicamente a fim de ilustrar de forma mais clara a proposta metodológica para a sequência de decisões durante o processo de elaboração do projeto, assim como demonstra a Figura 45. Um aspecto relevante é que, em consonância com a literatura, o método apresenta as três principais características do projeto performativo: 1) modelo geométrico, que se relaciona com a transformação, geração e parametrização das formas; 2) processos avaliativos, nos quais se integram a geometria e as técnicas de otimização que transformam e geram o modelo; 3) interatividade do projetista, que exerce o papel de mediador dos processos (ANDRADE, 2012; KALAY, 1999; KOLAREVIC, 2005; OXMAN, 2008, 2009).

Figura 45 – Fluxograma geral da metodologia proposta.



Fonte: elaborado pelo autor (2019).

De modo geral, a metodologia se configura em dois processos principais: o criativo e o sistemático. No primeiro há uma maior autonomia do projetista quanto à criação do conceito, partido e forma da edificação. Nesse contexto, a atividade inicial ocorre de forma analógica – assim como na maioria dos projetos performativos conforme destaca Andrade (2012) –, com a realização de croquis, por exemplo. Em um segundo momento as concepções iniciais são estruturadas para estabelecer tanto o *script* como relações matemáticas e geométricas para a formação do modelagem e a posterior geração de novas propostas. Tal procedimento visa, portanto, encontrar diferentes configurações de projeto a partir da automatização da otimização do desempenho energético. Sendo assim, são de suma importância os conhecimentos técnicos do projetista, principalmente aqueles que se referem aos sistemas de vedação e refrigeração que corroboram para a maior eficiência do edifício.

Em relação aos procedimentos sistemáticos, pode-se apontar as tarefas de otimização, avaliação e classificação do desempenho energético do projeto. Para cada etapa foram adotadas metodologias específicas que determinam não apenas a correta execução dos processos, mas também a sua validação. Na otimização foram adotadas as fases de pré-processamento, execução e pós-processamento (NGUYEN; REITER; RIGO, 2014) assim como o RTQ-C (BRASIL., 2018) para avaliação e classificação do desempenho energético conforme mencionado no subcapítulo 3.3. Embora não sejam os únicos métodos aplicáveis, optou-se pela utilização dos mesmos devido a aplicabilidade e adequação à realidade brasileira.

A fim de que os procedimentos propostos pela metodologia se tornem mais concisos, foram elaboradas diretrizes pertinentes a cada fase de projeto com o intuito de nortear a sua correta aplicação. Vale ressaltar que não foram delimitados critérios fechados para o processo inicial de criação da geometria, tendo em conta a liberdade e a particularidade de cada projeto. Entretanto, ainda que a modelagem paramétrica pressuponha a participação no processo criativo, a sua configuração no meio digital permite uma abordagem mais direcionada, de modo que se obtenham resultados mais satisfatórios. Sendo assim, as diretrizes foram organizadas no Quadro 6.

Quadro 6 - Diretrizes propostas para a metodologia.

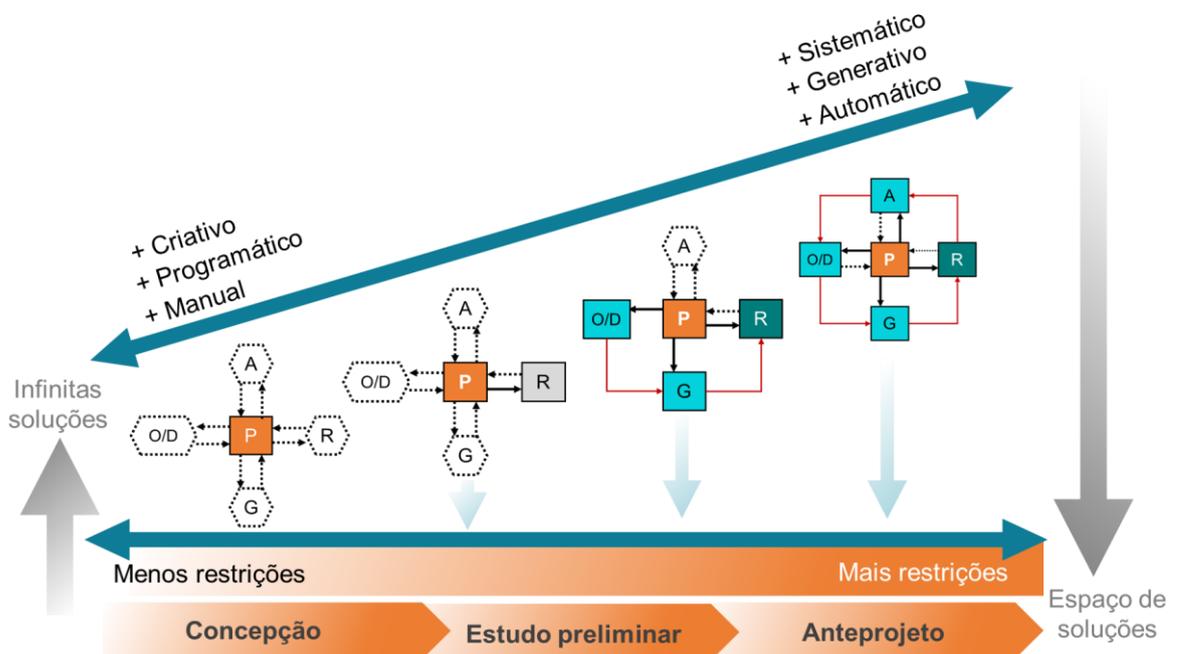
Modelagem Paramétrica	1. Estabelecer relações condicionais entre as variáveis para a criação de uma geometria associativa;
	2. Utilizar componentes que flexibilizam a variação dos dados de entrada para a automatização dos processos;
	3. Evitar longos blocos de programação, pois podem exigir maior processamento do computador;
	4. Organizar o <i>script</i> em grupos para facilitar a compreensão;
	5. Colocar breves explicações em cada grupo como descrição do procedimento criado a fim de facilitar o entendimento de <i>scripts</i> longos e complexos
	6. Simplificar, sempre que possível, a geometria do edifício proposto, principalmente em casos que contam com um elevado número de pavimentos;
Otimização	1. Definir de forma clara a quantidade de parâmetros em cada variável a fim de não dispendar tempo desnecessário no processo de otimização;
	2. Utilizar preponderantemente as variáveis que mais impactam o problema de projeto;
	3. Evitar o uso de variáveis contínuas, pois prolongam o tempo de otimização devido a presença de números decimais;
	4. Utilizar algoritmos que atendam de maneira adequada as especificidades do objetivo otimização;
	5. Organizar e gravar os dados gerados em cada otimização;
	6. Proporcionar, sempre que possível, uma opção alternativa para a escolha das soluções por critérios estéticos;
Avaliação e classificação do desempenho energético	1. Avaliar os dados de saída da simulação por meio de gráficos e tabelas a fim de verificar se estão pertinentes;
	2. Rever os dados de entrada do projeto caso tenham resultados muito acima ou abaixo do esperado, pois pode representar erros de modelagem;
	3. Utilizar normas (nacionais ou internacionais) para a inserção de dados para a simulação no edifício;
	4. Classificar o nível de desempenho conforme as orientações estabelecidas por norma;

Fonte: elaborado pelo autor (2019).

Para que a abordagem metodológica possa ser compreendida adequadamente, foi necessário estabelecer uma visão global dos processos, com a relação entre projetista, dispositivos computacionais, sequências de decisão e as etapas de projeto,

conforme ilustra a Figura 46. Apesar de toda a abstração pertinente aos elementos de programação para a elaboração da modelagem, a proposta teve como função evidenciar um pensamento sistêmico e cíclico que não se baseia por tentativa e erro como no método tradicional de concepção do objeto, mas sim por procedimentos sólidos, com fundamento técnico e matemático que auxiliem de modo mais objetivo a obtenção de edifícios com um alto desempenho energético. Como ressalvas finais, é importante enfatizar que o desenvolvimento do método de projeto performativo pode apresentar diferenças na eficiência de sua aplicabilidade devido a três fatores principais: 1) familiaridade do projetista com linguagens de programação para a modelagem paramétrica; 2) tipo de algoritmo e número de variáveis utilizadas no processo de otimização; e 3) configuração do sistema computacional utilizado para o desenvolvimento do projeto. Embora esses fatores possam afetar a realização das tarefas, não se apresentam como limitantes, uma vez que são passíveis de melhorias e (ou) adaptações.

Figura 46 - Definição esquemática da proposta do método de projeto performativo.



Fonte: elaborado pelo autor (2019).

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O desenvolvimento da proposta metodológica para a elaboração de projetos performativos foi capaz de associar aspectos referentes à modelagem paramétrica, técnicas de otimização, avaliação e classificação do desempenho energético de edifícios de escritórios. Assim sendo, considera-se que os objetivos da pesquisa foram alcançados e validados por meio dos procedimentos experimentais. Além disso, a compreensão dos aspectos teóricos relacionados ao projeto digital evidenciou uma carência de estudos recentes que buscam identificar as relações entre projetista e os dispositivos computacionais durante o processo de elaboração do projeto. Desta forma, o método apresentado permitiu balizar os aspectos pertinentes ao arcabouço conceitual da temática, bem como aplicá-los no estágio inicial de elaboração do projeto arquitetônico.

As ferramentas digitais de modelagem e otimização revelaram, em contraposição a ideia de limitação da atuação do projetista, uma ampla potencialidade de exploração e flexibilização na busca de alternativas relacionadas a eficiência energética. Em primeiro lugar, pode-se destacar a característica relativa combinação de dados frente às possibilidades permitidas pelas variáveis iniciais de estudo. Os resultados demonstraram que o algoritmo de otimização RBFOpt e a sua respectiva técnica de aprendizagem de máquina possibilitaram um rápido e significativo avanço na economia de energia elétrica dos edifícios dentro do campo de soluções. Esses aspectos concernentes à fase inicial de projeto corroboram para a delimitação de edifícios de alto desempenho o que, por sua vez, ratifica a hipótese do presente estudo. Outro ponto importante a se frisar é em relação à análise de sensibilidade, que pode servir como base para o aprimoramento e posterior detalhamento dos aspectos que mais influíram no objetivo do projeto.

Em relação a flexibilização do método, existem dois pontos principais oferecidos pelas plataformas digitais: 1) critério de escolha; e 2) adequação à proposta. No primeiro caso, o conjunto de alternativas proporcionado pela otimização pode ser direcionar a seleção da solução apenas pelo melhor desempenho ou por meio da associação de critérios estéticos. Já no que se refere a adequação da proposta, o sistema generativo permite a adaptação do código de programação a outras geometrias de edifício e (ou)

parâmetros conforme o objetivo pretendido. Sendo assim, a metodologia pode se configurar a diferentes grupos climáticos, restrições e particularidades de centros urbanos brasileiros mantendo-se a tipologia de escritórios e os procedimentos de avaliação e classificação do desempenho energético.

Esta pesquisa, portanto, não permitiu o desenvolvimento de uma proposta unicamente, mas também uma reflexão quanto à assimilação das tecnologias digitais na prática projetual dos projetistas. A resistência de muitos profissionais por medo de perder o papel de ator principal do projeto bem como a carência de leis e normativas que regulem de modo eficaz o desempenho energético dos projetos, tem inibido e até mesmo atrasado a penetração dos avanços tecnológicos na construção civil. Com a situação atual dos avanços do consumo de energia do setor, é cada vez mais necessário recorrer a técnicas e ferramentas que possam corroborar, de modo rápido e eficaz, para a mudança desse cenário.

Por fim, propõe-se como estudo futuro a compatibilização da metodologia proposta com *softwares* que utilizam a tecnologia *Building Information Modeling* (BIM), para a elaboração dos desenhos técnicos, detalhamentos e orçamento necessários para o desenvolvimento dos processos de projeto arquitetônico. Outro ponto a ser considerado é a possível adição de sistemas para a produção de energia que podem auxiliar de modo significativo o suprimento da demanda de energia elétrica nos edifícios.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDIN, A. R.; EL BAKERY, A. R.; MOHAMED, M. The role of nanotechnology in improving the efficiency of energy use with a special reference to glass treated with nanotechnology in office buildings. **Ain Shams Engineering Journal**, v. 9, n. 4, p. 2671–2682, 2018.

ADVANCED ARCHITECTURAL LAB. **Opossum**. Disponível em: <<https://aal.sutd.edu.sg/opossum/>>. Acesso em: 10 nov. 2018.

AGKATHIDIS, Asterios. **Generative design: Form + Technique**. London: Laurence King, 2015.

ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; DE MORAES GONÇALVES, J. L.; SPAVOREK, G. . Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013.

ANDRADE, M. L. V. X. **O projeto performativo na prática arquitetônica recente: estrutura conceitual**. 2012. 472 f. Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), 2012.

ARCHIDAILY. **Centro Nacional de Convenções Qatar Slash Arata Isozaki**. Disponível em: <<https://www.archdaily.com.br/br/01-149285/centro-nacional-de-convencoes-qatar-slash-arata-isozaki>>. Acesso em: 5 nov. 2019.

ASIMOV, M. **Introduction to Design**. New jersey: Prentice Hall, 1962.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT) / CB-55. **NBR 16401: Instalações de ar condicionado - Sistemas centrais e unitários – Parte 1: Projeto das instalações**. . Rio de Janeiro: 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 15.575: Edificações Habitacionais - Desempenho**. . Rio de Janeiro: 2013.

_____. **NBR 5413 - Iluminância de interiores**. . Rio de Janeiro: 1992.

ASTE, N.; BUZZETTI, M.; DEL PERO, C. LEONFORTE, F.. Glazing's techno-economic performance: A comparison of window features in office buildings in different climates. **Energy and Buildings**, v. 159, p. 123–135, 2018.

ATTIA, S.; HAMDY, M.; O'BRIEN, W.; CARLUCCI, S. Assessing gaps and needs for integrating building performance optimization tools in net zero energy buildings design. **Energy & Buildings**, v. 60, p. 110–124, 2013.

BAKAR, N. N. A.; HASSAN, M. Y.; ABDULLAH, H.; TAHMAN, H. A.; HUSSIN, F.; BANDI, M. Energy efficiency index as an indicator for measuring building energy performance: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 44, p. 1–11, 2015.

BAYAZIT, N.; INCEOGLU, M. (Org.). **Archit. Des.** iSTAMBUL: Design Research Society, 1978.

BRASIL. MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Balanco energético nacional 2019**. . Rio de Janeiro: 2019.

BRASIL. MINISTÉRIO DA INDÚSTRIA, COMÉRCIO EXTERIOR E SERVIÇOS. INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, Qualidade e Tecnologia (INMETRO). **Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas (RTQ-C)**. . Rio de Janeiro: 2013.

_____. **Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas (RTQ-C)**. . Rio de Janeiro: [s.n.], 2018. Disponível em: <www.inmetro.gov.br>.

BRASIL. **Decreto nº 4.0059, de 19 de dezembro de 2001. Regulamenta a Lei nº 10.295, de 17 de outubro de 2001, que dispõe sobre a Política Nacional de Conservação e Uso Racional de Energia, e dá outras providências**. . Brasília: 2001a. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/2001/d4059.htm>.

_____. **Diário Oficial da União**. Disponível em: <http://pesquisa.in.gov.br/imprensa/jsp/visualiza/index.jsp?data=05%2F06%2F2014&jornal=1&pagina=102&totalArquivos=164&utm_medium=website&utm_source=archdaily.com.br>. Acesso em: 5 out. 2019.

_____. **Lei nº 10.295, de 17 de outubro de 2001. Dispõe sobre a Política Nacional de Conservação e Uso Racional de Energia e dá outras providências**. . Brasília: 2001b. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/LEIS_2001/L10295.htm>.

BRASIL, Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética (EPE). **Status e benefícios da eficiência energética: perspectivas brasileiras e globais**, 2019.

BRASIL, Ministério de Minas e Energia. Secretaria de Planejamento e Desenvolvimento Energético. **Plano Nacional de Eficiência Energética**. . Brasília:, 2011.

_____. **Plano Nacional de Energia 2030**. . Brasília: [s.n.], 2007.

BROADBENT, G. **Design in architecture: architecture and human sciences**. London: John Wiley & Sons, 1973.

_____. Notas sobre la metodologáa del diseño arquitectónico. In: BROADBENT, G. (Org.). . **Metodol. del diseño Arquit.** Barcelona: Gustavo Gili, 1971. p. 21–35.

BROADBENTM G.; WARD, A. (Org.). **Design Methods in Architecture**. London: Lund Humpries, 1969.

BUILDING ENERGY SOFTWARE. **Honeybee**. Disponível em: <<https://www.buildingenergysoftwaretools.com/software/honeybee>>. Acesso em: 10 nov. 2018.

BURRY, M. **Scripting Cultures**. Chichester: John Wiley and Sons, 2011.

CALDAS, L.; SANTOS, L. Painting with light: An interactive evolutionary system for daylighting design. **Building and Environment**, v. 109, p. 154–174, 2016.

CARLO, J.; LAMBERTS, R. Development of envelope efficiency labels for commercial buildings: Effect of different variables on electricity consumption. **Energy and Buildings**, v. 40, n. 11, p. 2002–2008, 2008.

- CARTANA, R. P.; PEREIRA, F. O. R. Elementos de controle solar desenvolvidos com modelagem paramétrica e algoritmos evolutivos. **PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção**, v. 7, n. 3, p. 133, 31 out. 2016.
- CELANI, M. G; VAZ, C. E. CAD scripting and visual parametric modeling environments: a comparison from a pedagogical point of view. **PROARQ**, v. 18, p. 178–194, 2012.
- COATES, P. **Programming. Architecture**. Oxon: Routledge, 2010.
- COMPUTATIONAL INFRASTRUCTURE FOR OPERATIONS RESEARCH. **COIN-OR cup 216 winners announced**. Disponível em: <<https://www.coin-or.org/coin-or-cup-2016-winners-announced/>>. Acesso em: 10 nov. 2018.
- CONN, A.; SCHEINBERG, K.; VICENTE, L. **Introduction to Derivative-Free Optimization**. Philadelphia: Society for Industrial and Applied Mathematics, 2009.
- COPIELLO, S. **Building energy efficiency: A research branch made of paradoxes. Renewable and Sustainable Energy Reviews.**: Elsevier Ltd. , 2017
- COSTA, A.; NANNICINI, G. RBFOpt: an open-source library for black-box optimization with costly function evaluations. **Mathematical Programming Computation**, v. 10, n. 4, p. 597–629, 2018.
- CRISTINO, T. M.; FARIA NETO, A.; COSTA, A. F. B. Energy efficiency in buildings: analysis of scientific literature and identification of data analysis techniques from a bibliometric study. **Scientometrics**, v. 114, n. 3, p. 1275–1326, 2018.
- CROSS, N. **Design research: methods and perspectives**. Cambridge: MIT Press, 2003.
- CUBUKCUOGLU, C.; EKICI, B.; TASGETIREN, M. F.; SARIYILDIZ, S. OPTIMUS: Self-Adaptive Differential Evolution with Ensemble of Mutation Strategies for Grasshopper Algorithmic Modeling. **Algorithms**, v. 12, n. 7, p. 141, 2019.
- D'AGOSTINO, D.; DE' ROSSI, F.; MARIGLIANO, M.; MARINO, C.; MINICHELLO, F. Evaluation of the optimal thermal insulation thickness for an office building in different climates by means of the basic and modified “cost-optimal” methodology. **Journal of Building Engineering**, v. 24, p. 100743, 2019.
- DE VRIES, M.; WAGTER, H. A CAAD Model for Use in Early Design Phases. 1991, Cambridge: MIT Press, 1991. p. 215.
- DELGARM, N.; SAJADI, B.; AZARBAD, K.; DELGARM, S. Sensitivity analysis of building energy performance: A simulation-based approach using OFAT and variance-based sensitivity analysis methods. **Journal of Building Engineering**, v. 15, 2017, p. 181–193, 2018..
- EKICI, B.; CUBUKCUOGLU, C.; TURRIN, M.; SARIYILDIZ, I. S. Performative computational architecture using swarm and evolutionary optimisation: A review. **Building and Environment**, v. 147, 356-371, 2019.
- ELTAWHEEL, A.; SU, Y. Controlling venetian blinds based on parametric design; via implementing Grasshopper's plugins: A case study of an office building in Cairo. **Energy and Buildings**, v. 139, p. 31–43, 2017.

ERCAN, B.; ELIAS-OZKAN, S. T. Performance-based parametric design explorations: A method for generating appropriate building components. **Design Studies**, v. 38, p. 33–53, 2015.

EUROPEAN COMMISSION (EC). **Energy performance certificates in buildings and their impact on transaction prices and rents in selected EU countries. Final Report. Eur. Comm. (DGEnergy)**, 2013.

EUROPEAN COUNCIL (EC). **Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010 on the energy performance of buildings (recast) (EPBD recast)**, 2010.

_____. **Directive 93/76/EEC to Limit Carbon Dioxide Emissions by Improving Energy Efficiency**, 1993.

EVINS, R. A review of computational optimisation methods applied to sustainable building design. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 22, p. 230–245, 1 jun. 2013. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032113000920>>. Acesso em: 24 jul. 2018.

FANG, Y.; CHO, S. Design optimization of building geometry and fenestration for daylighting and energy performance. **Solar Energy**, v. 191, p. 7–18, 2019.

FENG, K.; LU, W.; WANG, Y. Assessing environmental performance in early building design stage: An integrated parametric design and machine learning method. **Sustainable Cities and Society**, v. 50, 2019.

FISCHER, T.; HERR, C. M. Teaching Generative Design. 2001, Politecnico di Milano, 2001. Disponível em: <<http://www.generativeart.com>>.

FRAZER, J. Creative Design and the Generative Evolutionary Paradigm. In: CORNE, W. D.; BENTLEY P. J. (Org.). **Creat. Evol. Syst.**: Morgan Kaufmann, 2002. p. 253–274.

FUERST, F.; MCALLISTER, P. The impact of energy performance certificates on the rental and capital values of commercial property assets. **Energy Policy**, v. 39, p. 6608–6614, 2011.

GITHUB. **RBFOpt**. Disponível em: <<https://github.com/coin-or/rbfopt>>. Acesso em: 10 nov. 2018.

GOOD DESIGN AWARD. **Good Design Award**. Disponível em: <<http://www.g-mark.org/?locale=en>>. Acesso em: 10 nov. 2018.

GREGORY, S. A. The Design Method. 1965. Disponível em: <http://www.ghbook.ir/index.php?name=فرهنگ_و_رسانه_های_نوین&option=com_dbook&task=readonline&book_id=13650&page=73&chckhashk=ED9C9491B4&Itemid=218&lang=fa&tmpl=component>.

GUTMANN, H.-M. **A Radial Basis Function Method for Global Optimization. Journal of Global Optimization**, 2001.

HENDRIX, E. M. T.; G.-TÓTH, B. **Introduction to Nonlinear and Global Optimization**. New York: Springer, 2010.

HOLMSTRÖM, K. An adaptive radial basis algorithm (ARBF) for expensive black-box global optimization. **Journal of Global Optimization**, v. 41, n. 3, p. 447–464, 2008.

HUANG, Y.; NIU, J. L. Optimal building envelope design based on simulated performance: History, current status and new potentials. **Energy and Buildings**, v. 117, p. 387–398, 2016.

INSTITUTO CAPIXABA DE PESQUISA, ASSISTÊNCIA TÉCNICA E EXTENSÃO RURAL (INCAPER). **Mapas de temperatura - normal climatológica**. Disponível em: <<https://meteorologia.incaper.es.gov.br/mapas-de-temperatura-normal-climatologica>>. Acesso em: 15 fev. 2019.

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA. **Tabela de edificações comerciais, de serviços e públicas**. Disponível em: <<http://www.inmetro.gov.br/consumidor/pbe/tabelas-comerciais.pdf>>. Acesso em: 5 out. 2019.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Annu. Energy Outlook 2019 with Proj. to 2050. Annual Energy Outlook 2019 with projections to 2050**. [S.l: s.n.], 2019. Disponível em: <<https://www.eia.gov/outlooks/aeo/pdf/aeo2019.pdf>>.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **Energy Efficiency 2019**. . Rio de Janeiro: 2019.

JABI, W. **Parametric Design for Architecture**. Laurence King Publishing, 2013.

JARDINI, J. A. et al. Brazilian Energy Crisis. **IEEE Power Engineering Review**, v. 22, n. 4, p. 21–24, 2002.

JENSEN, O. M.; HANSEN, A. R.; KRAGH, J. Market response to the public display of energy performance rating at property sales. **Energy Policy**, v. 93, p. 229–235, 2016.

JONES, C. Informe sobre la situación de la metodología del diseño. In: BROADBENT, G. (Org.). **Metodol. del diseño Arquít.** Barcelona: Gustavo Gili, 1971. p. 385–395.

JONES, D. R.; SCHONLAU, M.; WELCH, W. J. Efficient global optimization of expensive black-box functions. **Journal of Global optimization**, v. 13, n. 4, p. 455–492, 1998.

JONES, J. C. A method of Systematic Design. In: JONES, J. C.; THORNLEY, D. G. (Org.). . **Conf. Des. Methods**. London: Pergamon Press, 1963. p. 240.

KALAY, Y. **Architecture's new media: principles, theories and methods of computer-aided design**. Cambridge: MIT Press, 2004.

KALAY, Yehuda E. **Performance-based design. Automation in Construction**, 1999.

KHEIRI, Farshad. **A review on optimization methods applied in energy-efficient building geometry and envelope design. Renewable and Sustainable Energy Reviews**: Elsevier Ltd. , 2018

KIM, W.; JEON, Y.; KIM, Y. Simulation-based optimization of an integrated daylighting and HVAC system using the design of experiments method. **Applied Energy**, v. 162, p. 666–674, 2016.

KOLAREVIC, B. **Architecture in the digital age: design and manufacturing**. New

York: Spon Press, 2003.

_____. Computing the performative. In: KOLAREVIC, B.; MALKAWI, A. M. (Org.). **Performative Archit. beyond Instrum.** Spon Press ed. New York: Spon Press, 2005. p. 266.

KOLAREVIC, B. Back to the Future: Performative Architecture. **International Journal of Architectural Computing**, v. 2, n. 1, p. 43–50, 2004.

KOLDA, T. G.; LEWIS, R. M.; TORCZON, V. Optimization by Direct Search: New Perspectives on Some Classical and Modern Methods. **SIAM Review**, v. 45, n. 3, p. 385–482, 2003.

KONIS, K.; GAMAS, A.; KENSEK, K. Passive performance and building form: An optimization framework for early-stage design support. 2016.

KOWALTOWSKI, D. C. C. K. et al. Reflexão sobre metodologias de projeto arquitetônico. **Ambiente Construído**, v. 6, n. 2, p. 7–19, 2006.

LADYBUG TOOLS. **Ladybug Tools**. Disponível em: <<https://www.ladybug.tools/>>. Acesso em: 10 nov. 2018.

LAMBERTS, R.; GOULART, S.; CARLO, J.; WESTPAHL, F. Regulation for energy efficiency labelling of commercial buildings in Brazil. 2007, Crete Island:2007. p. 27–29.

LAMBERTS, R.; GHISI, E.; RAMOS, G. **Impactos da Adequação Climática Sobre a Eficiência Energética e o Conforto Térmico de Edifícios de Escritórios no Brasil**. Florianópolis: 2006.

LAWSON, B. **How designers think: the design process demystified**. 4. ed. Oxford: Elsevier/ Architectural, 2005.

LI, Y.; KUBICKI, S.; GUERRIERO, A.; REZGUI, Y. Review of building energy performance certification schemes towards future improvement. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 113, 2019.

LIGGETT, R. S. Automated facilities layout: past, present and future. **Automation in Construction**, v. 9, n. 2, p. 2000–197, 2000.

LIU, L.; WU, D.; LI, X.; HOU, S.; LIU, C. JONES, P. Effect of geometric factors on the energy performance of high-rise office towers in Tianjin, China. **Building Simulation**, v. 10, n. 5, p. 625–641, 2017.

LOBACCARO, G.; WIBERG, A. H.; CECI, G.; LOLLI, N.; BERARDI, U. Parametric design to minimize the embodied GHG emissions in a ZEB. **Energy and Buildings**, v. 167, p. 106–123, 2018.

MACHAIRAS, V.; TSANGRASSOULIS, A.; AXARLI, K. **Algorithms for optimization of building design: A review**. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**: Elsevier Ltd. , 2014

MAO, Jiachen; PAN, Yiqun; FU, Yangyang. Towards fast energy performance evaluation: A pilot study for office buildings. **Energy and Buildings**, v. 121, p. 104–113, 2016

MARKUS, T. El Dimensionado y la valoración del proceso de ejecución de um edificio

como método de diseño. In: BROADBENT, G. (Org.). . **Metodol. del diseño Arquit.** Barcelona: Gustavo Gili, 1971. p. 235–256.

MAYKOT, J. K.; RUPP, R. F.; GHISI, E. A field study about gender and thermal comfort temperatures in office buildings. **Energy and Buildings**, v. 178, p. 254–264, 2018.

MELO, A. P.; CÓSTOLA, D.; LAMBERTS, R.; HENSEN, J. L. M. Assessing the accuracy of a simplified building energy simulation model using BESTEST: The case study of Brazilian regulation. **Energy and Buildings**, v. 45, p. 219–228, 2012.

MELO, A. P.; SORGATO, M. J.; LAMBERTS, R. Building energy performance assessment: Comparison between ASHRAE standard 90.1 and Brazilian regulation. **Energy and Buildings**, v. 70, p. 372–383, 2014.

MEREDITH, M. Never enough: transform, repeat ad nauseam. In: MEREDITH, M.; SAKAMOTO, T.; FERRÉ, A. (Org.). **From Control to Des. Parametr. algorithmic Archit.** Barcelona: Actar, 2008. p. 4–33.

MITCHELL, M. **Evolutionary computation.** Disponível em: <<http://cognet.mit.edu/MITECS/Articles/mitchell>>. Acesso em: 20 mar. 2019.

MÜLLER, J.; SHOEMAKER, C. A. Influence of ensemble surrogate models and sampling strategy on the solution quality of algorithms for computationally expensive black-box global optimization problems. **Journal of Global Optimization**, v. 60, n. 2, p. 123–144, 2014.

NEGENDAHL, K. **Building performance simulation in the early design stage: An introduction to integrated dynamic models.** Automation in Construction: Elsevier B.V. , 2015

NEVES, L. O.; MARQUES, T. H. T. Building Envelope Energy Performance of High-rise Office buildings in Sao Paulo City, Brazil. 2017. Procedia Environmental Sciences, 2017. p. 821–829.

NGUYEN, A.; REITER, S.; RIGO, P. A review on simulation-based optimization methods applied to building performance analysis. **Applied Energy**, v. 113, p. 1043–1058, 2014.

OLIVEIRA FERNANDES, L.; LABAKI, L. C. The Influence of the Shading of Surroundings on the Brazilian Labeling of Building Energy Efficiency. 2012, Lima: 2012.

ØSTERGÅRD, T.; JENSEN, R. L.; MAAGAARD, S. E. **Building simulations supporting decision making in early design - A review.** Renewable and Sustainable Energy Reviews: Elsevier Ltd. , 2016

_____. Early Building Design: Informed decision-making by exploring multidimensional design space using sensitivity analysis. **Energy and Buildings**, v. 142, p. 8–22, 2017.

OXMAN, R. Digital architecture as a challenge for design pedagogy: theory, knowledge, models and medium. **Design Studies**, v. 29, n. 2, p. 99–120, 2008.

_____. Performative design: A performance-based model of digital architectural design. **Environment and Planning B: Planning and Design**, v. 36, n. 6, p. 1026–1037, 2009.

_____. Theory and design in the first digital age. **Design Studies**, v. 27, n. 3, p. 229–265, 2006.

_____. Thinking difference: Theories and models of parametric design thinking. **Design Studies**, v. 52, p. 4–39, 2017.

PAGE, J. Review of papers presented at the conference. In: JONES, J. C.; THORNLEY, D. G. (Org.). . **Conf. Des. Methods**. London: Pergamon Press, 1963. p. 240.

PASETTI MONIZZA, G.; BENDETTI, C.; MATT, D. T. Parametric and Generative Design techniques in mass-production environments as effective enablers of Industry 4.0 approaches in the Building Industry. **Automation in Construction**, v. 92, p. 270–285, 2018.

PAULA, G. A. **Modelos de regressão com apoio computacional**. São Paulo, 2013.

PÉREZ-LOMBARD, L.; PÉREZ-LOMBARD, L.; ORTIZ, J.; GONZÁLEZ, R.; MAESTRE, I. R. A review of benchmarking, rating and labelling concepts within the framework of building energy certification schemes. **Energy and Buildings**, v. 41, n. 3, p. 272–278, 2009.

PICCO, M.; LOLLINI, R.; MARENGO, M. Towards energy performance evaluation in early stage building design: A simplification methodology for commercial building models. **Energy and Buildings**, v. 76, p. 497–505, 2014.

PREFEITURA MUNICIPAL DE VITÓRIA. **Enseada do Suá**. Disponível em: <<http://legado.vitoria.es.gov.br/regionais/bairros/regiao5/enseadadosua.asp>>. Acesso em: 15 dez. 2018.

_____. **Lei nº 4821 - Institui o código de edificações do município de Vitória e da outras providências**. . Vitória: [s.n.], 1998. Disponível em: <<http://leismunicipa.is/drntp>>.

PROGRAMA BRASILEIRO DE ETIQUETAGEM. **Regulamentos**. Disponível em: <<http://www.pbeedifica.com.br/node/38>>. Acesso em: 5 nov. 2019.

PROGRAMA NACIONAL DE CONSERVAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA. **Etiquetagem em edificações**. Disponível em: <<http://www.eletrabras.com/pci/main.asp?View=%7BF48ABFE1-2335-4951-9FF9-C5E9B27815AC%7D>>. Acesso em: 2 maio 2019.

RACKES, A.; MELO, A. P.; LAMBERTS, R. Naturally comfortable and sustainable: Informed design guidance and performance labeling for passive commercial buildings in hot climates. **Applied Energy**, v. 174, p. 256–274, 2016.

REZAEI, R.; BROWN, J.; HAYMAKER, J.; AUGENBROE, G. A novel inverse data driven modelling approach to performance-based building design during early stages. **Advanced Engineering Informatics**, v. 41, 2019.

RITTEL, H. W. J.; WEBBER, M. M. Dilemmas in a General Theory of Planning*. **Policy Sciences**, v. 4, p. 155–169, 1973.

RORIZ, M. Classificação de Climas do Brasil – Versão 3.0. **Antac**, p. 1–5, 2014.

RUPARATHNA, R.; HEWAGE, K.; SADIQ, R. **Improving the energy efficiency of**

the existing building stock: A critical review of commercial and institutional buildings. Renewable and Sustainable Energy Reviews. Elsevier Ltd. , 1 jan. 2016

RUTTEN, D. Galapagos: On the logic and limitations of generic solvers. **Architectural Design**, v. 83, n. 2, p. 132–135, 2013.

SASAKI, M. **Flux structure**. Tokyo: TOTO Shuppan, 2005.

SCHUMACHER, P. Parametricism. In: SCHUMACHER, P. (Org.). . **Parametr. 2.0 Rethink. Archit. Agenda 21st Century**. London: John Wiley and Sons, 2016. p. 8–17.

_____. **Parametrism as a Style e Parametrism Manifesto**. London: New Architectural Group, 2008.

SHEA, K.; AISH, R.; GOURTOVAIA, M. Towards integrated performance-driven generative design tools. Elsevier, 2005. p. 253–264.

SHEN, L.; HE, B.; JIAO, L.; SONG, X.; ZHANG, X. Research on the development of main policy instruments for improving building energy-efficiency. **Journal of Cleaner Production**, v. 112, p. 1789–1803, 2016.

SHI, X.; TIAN, Z.; CHEN, W.; SI, B.; JIN, X. A review on building energy efficient design optimization rom the perspective of architects. 2016a.

_____. **A review on building energy efficient design optimization rom the perspective of architects. Renewable and Sustainable Energy Reviews.** Elsevier Ltd. , 1 nov. 2016b

SINDICATO DA CONSTRUÇÃO CIVIL (SINDUSCON) ES. **Pesquisa**. Disponível em: <<http://www.sinduscon-es.com.br/v2/cgi-bin/pesquisa.asp>>. Acesso em: 10 nov. 2018.

SINGAPORE GOOD DESIGN. **Opossum architectural design optmization tool**. Disponível em: <<http://www.sgmark.org/winners/singapore-university-of-technology-and-design-opossum-architectural-design-optimization-tool/>>. Acesso em: 10 nov. 2018.

SINGH, V.; GU, N. Towards an integrated generative design framework. **Design Studies**, v. 33, n. 2, p. 185–207, 2012.

SLANN, P. A. Foreword. In: JONES, J. C.; THORNLEY, D. G. (Org.). . **Conf. Des. Methods**. London: Pergamon Press, 1963. p. 240.

SODDU, C. The design of morphogenesis. An experimental research about the logical procedures in design processes. **DEMETRA**, 1994.

STEELE, J. **Arquitetura y revolucion digital**. Barcelona: Gustavo Gili, 2001.

SUH, W. J.; PARK, C. S. Heuristic vs. meta-heuristic optimal energy design for an office building. **Sustainability (Switzerland)**, v. 9, n. 4, 2017.

SZALAPAJ, P. **Contemporary architecture and the digital design process**. Oxford: Elsevier, 2003.

TERZIDIS, K. **Algorithmic Architecture**. Oxford: Elsevier, 2006.

TIAN, W. A review of sensitivity analysis methods in building energy analysis. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 2013

TIAN, Z.; ZHANG, X.; JIN, X.; ZHOU, X.; SI, B., SHI, X. Towards adoption of building energy simulation and optimization for passive building design: A survey and a review. **Energy and Buildings**, 2018a

_____. **Towards adoption of building energy simulation and optimization for passive building design: A survey and a review**. *Energy and Buildings*. Elsevier Ltd. , 1 jan. 2018b

UNITED STATES DEPARTMENT OF ENERGY. **Tips and Tricks for Using EnergyPlus**, 2018.

WAIBEL, C.; WORTMANN, T.; EVINS, R.; CARMELIET, J. Building energy optimization: An extensive benchmark of global search algorithms. **Energy and Buildings**, v. 187, p. 218–240, 2019.

WALSH, A.; CÓSTOLA, D.; LABAKI, L. C. Comparison of three climatic zoning methodologies for building energy efficiency applications. **Energy and Buildings**, v. 146, p. 111–121, 2017a.

WALSH, A.; CÓSTOLA, D.; LABAKI, L. C. Performance-based validation of climatic zoning for building energy efficiency applications. **Applied Energy**, v. 212, p. 416–427, 2018.

_____. Review of methods for climatic zoning for building energy efficiency programs. **Building and Environment**, v. 112, p. 337–350, 2017b.

_____. Validation of the climatic zoning defined by ASHRAE standard 169-2013. **Energy Policy**, v. 135, 2019.

WANG, B.; MALKAWI, A. Design-based natural ventilation evaluation in early stage for high performance buildings. **Sustainable Cities and Society**, v. 45, p. 25–37, 2019.

WONG, L. I.; KRÜGER, E. Comparing energy efficiency labelling systems in the EU and Brazil: Implications, challenges, barriers and opportunities. **Energy Policy**, v. 109, p. 310–323, 2017.

WOODBURY, R. **Elements of parametric design**. Routledge, 2010.

WORTMANN, T. **Efficient, visual and interactive architectural design optimization with model-based methods**. 2018. 325 f. Thesis (Doctor of Philosophy) – Singapore University of Technology and Design, Singapore, 2018.

_____. Model-based Optimization for Architectural Design: Optimizing Daylight and Glare in Grasshopper. **Technology|Architecture + Design**, v. 1, n. 2, p. 176–185, 2017.

WORTMANN, T.; NANNICINI, G. Introduction to architectural design optimization. In: KARAKITSIOU, A. et al. (Org.). **City Networks - Plan. Heal. Sustain**. Springer International Publishing, 2017. v. 128. p. 259–278.

WORTMANN, T.; TUNÇER, B. Differentiating parametric design: Digital workflows in contemporary architecture and construction. **Design Studies**, v. 52, p. 173–197, 2017.

WRIGHT, J. A. **The optimised design of HVAC systems**. 1986. Loughborough University of Technology, 1986.

XU, Z.; LIU, S.; HU, G.; SPANOS, C. Optimal coordination of air conditioning system and personal fans for building energy efficiency improvement. **Energy and Buildings**, v. 141, p. 308–320, 2017.

YANG, C.; LI, H.; REZGUI, Y.; PETRI, I.; YUCE, B.; CHEN, B.; JAYAN, B. High throughput computing based distributed genetic algorithm for building energy consumption optimization. **Energy and Buildings**, v. 76, p. 92–101, 2014.

YU, R.; GERO, J.; GU, N. Architects' Cognitive Behaviour in Parametric Design. **International Journal of Architectural Computing**, v. 13, n. 1, p. 83–101, 2015.

YU, X.; YAN, D. SUN, K.; HONG, T.; ZHU, D. Comparative study of the cooling energy performance of variable refrigerant flow systems and variable air volume systems in office buildings. **Applied Energy**, v. 183, p. 725–736, 2016..

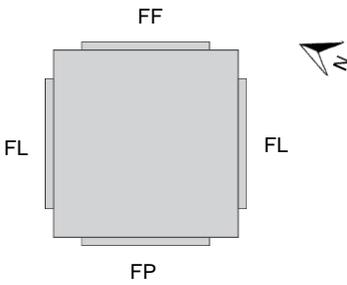
ZHANG, Y.; BAI, X.; MILLS, F.; PEZZEY, J. Rethinking the role of occupant behavior in building energy performance: A review. **Energy and Buildings**, v. 172, p. 279–294, 2018.

ZOU, P. X.W.; WAGLE, D.; ALAM, M. Strategies for minimizing building energy performance gaps between the design intend and the reality. **Energy and Buildings**, v. 191, p. 31–41, 2019.

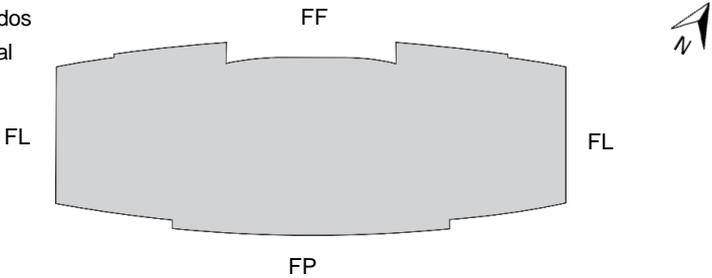
APÊNDICES

APÊNDICE A -

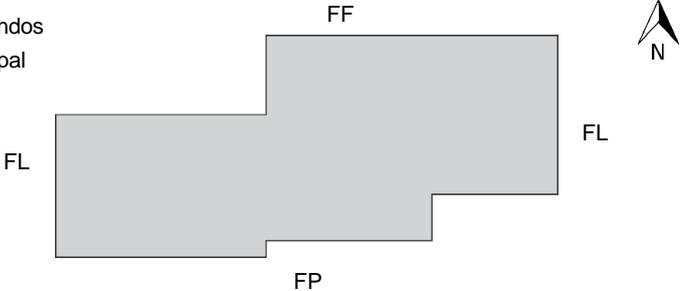
Levantamento de edifícios para a caracterização do modelo genérico

Edifício 01 - Vértice Empresarial		
Endereço: R. Ten. Mário Francisco Brito, 420 - Enseada do Suá, Vitória - ES Construtora: Morar Data da conclusão: 2016	2. Registro fotográfico do edifício 	
1. Características gerais do edifício		
Dimensão do lote: 4.240 m ²		
Posição do lote na quadra: esquina		
Nº total de pavimentos: 20		
Nº de pavimentos tipo: 16		
Área dos escritórios: 24 a 281 m ²		
Média de escritórios por pavimento: 10		
Pé-direito: 3 m		
Geometria: Retangular		
Orientação solar (fachada principal): noroeste		
Presença de sombreadores: vert. e horiz.		
3. Tipologia Arquitetônica		
FL - Fachada Lateral FF - Fachada de Fundos FP - Fachada Principal		
		
Forma, orientação e identificação das fachadas do pavimento tipo (sem escala).		
4. Composição dos materiais do edifício		
Paredades externas (fachada principal e laterais)	bloco de concreto (14x19x39cm) com acabamento em revestimento cerâmico - espesura de 18 cm	
Paredes internas	Drywall com chapas duplas de gesso acartonado e isolamento de lâ de rocha - espesura de 12 cm	
Composição das janelas	Esquadrias de alumínio com vidro laminado reflexivo cinza de 8 mm	
Cobertura	Telha metálica	
Lajes	Laje de concreto protendida de 20 cm de espesura	
5. Características das fachadas		
FP - Fachada Prncial		
Área da fachada (m ²)	Área de janelas (m ²)	Percentual de abertura
1662,66	641,55	39%
FL - Fachadas Laterais		
Área da fachada (m ²)	Área de janelas (m ²)	Percentual de abertura
1662,66	641,55	39%
FF - Fachada de Fundos		
Área da fachada (m ²)	Área de janelas (m ²)	Percentual de abertura
1662,66	641,55	39%
PAF _T - Percentual de Abertura de Fachada Total		39%
6. Condicionamento de ar		
Tipo de ar-condicionado: Split		

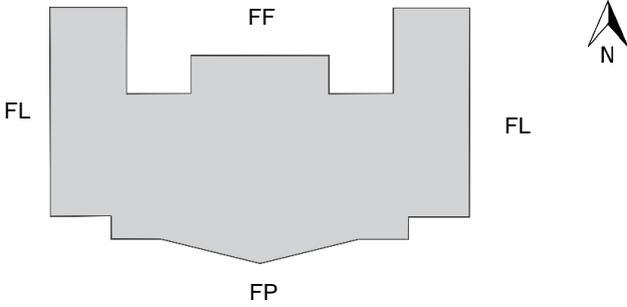
Fonte: elaborado pelo autor (2019).

Edifício 02 - Affinity Work		
Endereço: R. José Alexandre Buaiz, 350 - Enseada do Suá, Vitória - ES	2. Registro fotográfico do edifício 	
Construtora: Lorenge		
Data da conclusão: 2008		
1. Características gerais do edifício		
Dimensão do lote: 4.530 m ²		
Posição do lote na quadra: esquina		
Nº total de pavimentos: 22		
Nº de pavimentos tipo: 19		
Área dos escritórios: 28 a 35 m ²		
Média de escritórios por pavimento: 15		
Pé-direito: 2,88 m		
Geometria: Retangular		
Orientação solar (fachada principal): sudeste		
Presença de sombreadores: não possui		
3. Tipologia Arquitetônica		
FL - Fachada Lateral FF - Fachada de Fundos FP - Fachada Principal		
Forma, orientação e identificação das fachadas do pavimento tipo (sem escala).		
4. Composição dos materiais do edifício		
Paredade da fachada principal	bloco cerâmico (14x19x29cm) com com pele de vidro reflexivo azul (8 mm) - espesura de 27,5 cm	
Paredes das fachadas secundárias	bloco cerâmico (14x19x29cm) com acabamento em pintura bege - espesura 18 cm	
Paredes internas	Drywall com chapas duplas de gesso acartonado e isolamento de lã de rocha - espesura de 10 cm	
Composição das janelas	Esquadrias de alumínio com vidro reflexivo azul de 8 mm	
Cobertura	Laje impermeabilizada	
Lajes	Laje de concreto protendida de 20 cm de espesura	
5. Características das fachadas		
FP - Fachada Princial		
Área da fachada (m ²)	Área de janelas (m ²)	Percentual de abertura
2382,09	1145,5	48%
FL - Fachadas Laterais		
Área da fachada (m ²)	Área de janelas (m ²)	Percentual de abertura
532,56	13,68	3%
FF - Fachada de Fundos		
Área da fachada (m ²)	Área de janelas (m ²)	Percentual de abertura
2382,09	862	36%
PAFT - Percentual de Abertura de Fachada Total	35%	
6. Condicionamento de ar		
Tipo de ar-condicionado: Split		

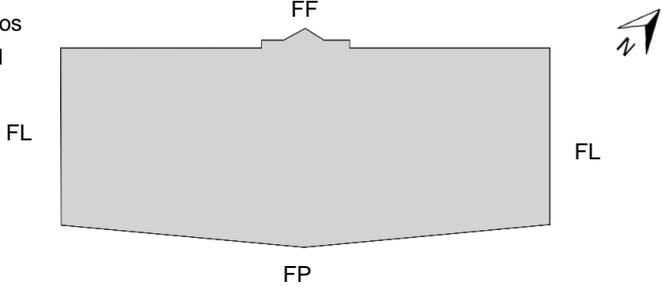
Fonte: elaborado pelo autor (2019).

Edifício 03 - Enseada Trade Center		
Endereço: R. Prof. Almeida Cousin, 125 - Enseada do Suá, Vitória - ES	2. Registro fotográfico do edifício 	
Construtora: Lorenge		
Data da conclusão: 2007		
1. Características gerais do edifício		
Dimensão do lote: 4.000 m ²		
Posição do lote na quadra: meio		
Nº total de pavimentos: 20		
Nº de pavimentos tipo: 17		
Área dos escritórios: 26 a 52 m ²		
Média de escritórios por pavimento: 17		
Pé-direito: 2,85 m		
Geometria: Retangular		
Orientação solar (fachada principal): sul		
Presença de sombreadores: não possui		
3. Tipologia Arquitetônica		
FL - Fachada Lateral FF - Fachada de Fundos FP - Fachada Principal		
Forma, orientação e identificação das fachadas do pavimento tipo (sem escala).		
4. Composição dos materiais do edifício		
Paredade da fachada principal	bloco cerâmico (14x19x29cm) com com pele de vidro reflexivo azul (8 mm) - espesura de 27,5 cm	
Paredes das fachadas secundárias	bloco cerâmico (14x19x29cm) com acabamento em pastilha bege claro - espesura 18 cm	
Paredes internas	Drywall com chapas duplas de gesso acartonado e isolamento de lã de rocha - espesura de 10 cm	
Composição das janelas	Esquadrias de alumínio com vidro reflexivo azul de 8 mm	
Cobertura	Laje impermeabilizada	
Lajes	Laje de concreto nervurada de 27,5 cm de espesura	
5. Características das fachadas		
FP - Fachada Princial		
Área da fachada (m ²)	Área de janelas (m ²)	Percentual de abertura
2816,77	968,4	34%
FL - Fachadas Laterais		
Área da fachada (m ²)	Área de janelas (m ²)	Percentual de abertura
1350	171	13%
FF - Fachada de Fundos		
Área da fachada (m ²)	Área de janelas (m ²)	Percentual de abertura
2816,77	968,4	34%
PAF _T - Percentual de Abertura de Fachada Total		27%
6. Condicionamento de ar		
Tipo de ar-condicionado: ar-condicionado central		

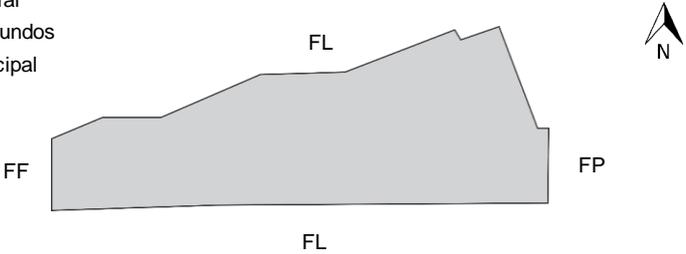
Fonte: elaborado pelo autor (2019).

Edifício 04 - Petro Tower Business		
Endereço: Av. Nossa Sra. dos Navegantes, n. 451 - Enseada do Suá, Vitória - ES	2. Registro fotográfico do edifício 	
Construtora: Lorenge		
Data da conclusão: 2004		
1. Características gerais do edifício		
Dimensão do lote: 4.240 m ²		
Posição do lote na quadra: esquina		
Nº total de pavimentos: 20		
Nº de pavimentos tipo: 17		
Área dos escritórios: 32 a 44 m ²		
Média de escritórios por pavimento: 15		
Pé-direito: 2,88 m		
Geometria: irregular		
Orientação solar (fachada principal): sul		
Presença de sombreadores: não possui		
3. Tipologia Arquitetônica		
FL - Fachada Lateral FF - Fachada de Fundos FP - Fachada Principal		
Forma, orientação e identificação das fachadas do pavimento tipo (sem escala).		
4. Composição dos materiais do edifício		
Paredade da fachada principal	bloco cerâmico (14x19x29cm) com com pele de vidro reflexivo prata (6 mm) - espesura de 27,5 cm	
Paredes das fachadas secundárias	bloco cerâmico (14x19x29cm) com acabamento em pastilha bege claro - espesura 18 cm	
Paredes internas	Drywall com chapas duplas de gesso acartonado e isolamento de lã de rocha - espesura de 10 cm	
Composição das janelas	Esquadrias de alumínio com vidro reflexivo prata de 6 mm	
Cobertura	Laje impermeabilizada	
Lajes	Laje de concreto protendida de 20 cm de espesura	
5. Características das fachadas		
FP - Fachada Princial		
Área da fachada (m ²)	Área de janelas (m ²)	Percentual de abertura
2741,23	1087,66	40%
FL - Fachadas Laterais		
Área da fachada (m ²)	Área de janelas (m ²)	Percentual de abertura
1037,84	603,84	58%
FF - Fachada de Fundos		
Área da fachada (m ²)	Área de janelas (m ²)	Percentual de abertura
2741,23	192,27	7%
PAF _T - Percentual de Abertura de Fachada Total		33%
6. Condicionamento de ar		
Tipo de ar-condicionado: ar-condicionado central		

Fonte: elaborado pelo autor (2019).

Edifício 05 - Work Center Office		
Endereço: R. José Alexandre Buaiz, 300 - Enseada do Suá, Vitória - ES	2. Registro fotográfico do edifício 	
Construtora: Lorenge		
Data da conclusão: 2010		
1. Características gerais do edifício		
Dimensão do lote: 4.130 m ²		
Posição do lote na quadra: meio		
Nº total de pavimentos: 21		
Nº de pavimentos tipo: 17		
Área dos escritórios: 55 a 82 m ²		
Média de escritórios por pavimento: 8		
Pé-direito: 2,88 m		
Geometria: retangular		
Orientação solar (fachada principal): sudeste		
Presença de sombreadores: não possui		
3. Tipologia Arquitetônica		
FL - Fachada Lateral FF - Fachada de Fundos FP - Fachada Principal		
Forma, orientação e identificação das fachadas do pavimento tipo (sem escala).		
4. Composição dos materiais do edifício		
Paredade da fachada principal	bloco cerâmico (14x19x29cm) com com pele de vidro reflexivo azul (10 mm)/ ACM - espesura de 27,5 cm	
Paredes das fachadas secundárias	bloco cerâmico (14x19x29cm) com acabamento em pintura branca - espesura 18 cm	
Paredes internas	Drywall com chapas duplas de gesso acartonado e isolamento de lã de rocha - espesura de 10 cm	
Composição das janelas	Esquadrias de alumínio com vidro reflexivo azul de 6 mm	
Cobertura	Laje impermeabilizada	
Lajes	Laje de concreto protendida de 20 cm de espesura	
5. Características das fachadas		
FP - Fachada Princial		
Área da fachada (m ²)	Área de janelas (m ²)	Percentual de abertura
2689,34	1040	39%
FL - Fachadas Laterais		
Área da fachada (m ²)	Área de janelas (m ²)	Percentual de abertura
903,7	147,64	16%
FF - Fachada de Fundos		
Área da fachada (m ²)	Área de janelas (m ²)	Percentual de abertura
2689,34	1028,84	38%
PAF _T - Percentual de Abertura de Fachada Total		33%
6. Condicionamento de ar		
Tipo de ar-condicionado: ar-condicionado central		

Fonte: elaborado pelo autor (2019).

Edifício 06 - Global Tower		
Endereço: Av. Nossa Sra. dos Navegantes, 955 - Enseada do Suá, Vitória - ES	2. Registro fotográfico do edifício	
Construtora: Galwan		
Data da conclusão: 2009		
1. Características gerais do edifício		
Dimensão do lote: 6.630 m ²		
Posição do lote na quadra: meio		
Nº total de pavimentos: 22		
Nº de pavimentos tipo: 19		
Área dos escritórios: 48 a 138 m ²		
Média de escritórios por pavimento: 10		
Pé-direito: 2,60 m		
Geometria: irregular		
Orientação solar (fachada principal): leste		
Presença de sombreadores: não possui		
3. Tipologia Arquitetônica		
FL - Fachada Lateral FF - Fachada de Fundos FP - Fachada Principal		
Forma, orientação e identificação das fachadas do pavimento tipo (sem escala).		
4. Composição dos materiais do edifício		
Paredade da fachada principal	bloco cerâmico (14x19x29cm) com com pele de vidro reflexivo azul (8 mm) - espesura de 27,5 cm	
Paredes das fachadas secundárias	bloco cerâmico (14x19x29cm) com acabamento em pintura bege clara - espesura 18 cm	
Paredes internas	Drywall com chapas duplas de gesso acartonado e isolamento de lâ de rocha - espesura de 10 cm	
Composição das janelas	Esquadrias de alumínio com vidro reflexivo azul de 8 mm	
Cobertura	Laje impermeabilizada	
Lajes	Laje de concreto protendida de 22 cm de espesura	
5. Características das fachadas		
FP - Fachada Princial		
Área da fachada (m ²)	Área de janelas (m ²)	Percentual de abertura
2223	1710	77%
FL - Fachadas Laterais		
Área da fachada (m ²)	Área de janelas (m ²)	Percentual de abertura
5928	456	8%
FL - Fachadas Laterais		
Área da fachada (m ²)	Área de janelas (m ²)	Percentual de abertura
5928	3876	65%
FF - Fachada de Fundos		
Área da fachada (m ²)	Área de janelas (m ²)	Percentual de abertura
561	367	65%
PAF _T - Percentual de Abertura de Fachada Total		44%
6. Condicionamento de ar		
Tipo de ar-condicionado: ar-condicionado central		

Fonte: elaborado pelo autor (2019).

APÊNDICE B - Especificação da composição dos materiais de construção do modelo genérico

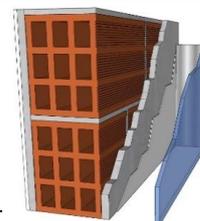
Composição da parede de vedação externa

Alvenaria com tijolos de 9 furos quadrados (14 x 19 x 29 cm), reboco de 1,5 cm em ambas as faces, 0,5 cm de massa corrida na parte interna e pintura na parte externa

U - Transmitância térmica da parede [W/(m²K)] = 1,30

ε - Emissividade das paredes = 0,84

α - Absortância das paredes externas = 0,4



Propriedades térmicas dos materiais utilizados na alvenaria

	Camadas	Materiais	Espessura (cm)	λ - Condutividade Térmica [W/(m.K)]	ρ - Densidade (Kg/m³)	c - Calor Específico (j/kg.k)	Rt - Resistência Térmica [(m².k)/w]
Paredes internas e externas = 27,5 cm	1ª	Masas corrida	0,50	1,15	2000	1000	-
	2ª	Argam. (reboco)	1,5	1,15	1800	1000	-
	3ª	Cerâmica	1,25	0,9	1300	920	-
	4ª	Ar	3	-	-	-	0,16
	5ª	Cerâmica	1,25	0,9	1300	920	-
	6ª	Ar	3	-	-	-	0,16
	7ª	Cerâmica	1,25	0,9	1300	920	-
	8ª	Ar	3	-	-	-	0,16
	9ª	Cerâmica	1,25	0,9	1300	920	-
	10ª	Argam. (reboco)	1,5	1,15	1800	1000	-
	11ª	Ar	9,2	-	-	-	0,17

Propriedades térmicas do vidro laminado reflexivo azul - última camada da composição

Material	Tsol - Transmitância solar	Rsol - Reflectância solar	Tvis - Transmitância à radiação no espectro visível	Rvis - Reflectância visível	Emis1 - Emissividade e na face 1	Emis2 - Emissividade na face 2	λ - Condutividade Térmica [W/(m.K)]
Vidro 8mm	0,47	0,12	0,55	0,14	0,84	0,84	1

Fonte: elaborado pelo autor (2019).

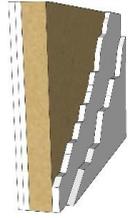
Composição da parede de vedação interna

Drywall de 10 cm, com duas placas em ambas as faces da parede e isolamento acústico de lã de rocha

U - Transmitância térmica da parede [W/(m²K)] = 1,84

ε - Emissividade das paredes = 0,9

α - Absortância das paredes externas = 0,3

**Propriedades térmicas dos materiais utilizados na alvenaria**

	Camadas	Materiais	Espessura (cm)	λ - Condutividade Térmica [W/(m.K)]	ρ - Densidade (Kg/m³)	c - Calor Específico (j/kg.k)	Rt - Resistência Térmica [(m².k)/w]
Paredes internas e externas = 27,5 cm	1ª	gesso acartonado	1,25	0,5	1000	840	-
	2ª	gesso acartonado	1,25	0,5	1000	840	-
	3ª	lã de rocha	5	0,045	200	750	-
	4ª	gesso acartonado	1,25	0,5	1000	840	-
	5ª	gesso acartonado	1,25	0,5	1000	840	-

Fonte: elaborado pelo autor (2019).

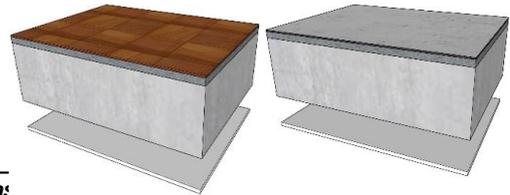
Composição das lajes e da cobertura

Laje protendida 20 cm com piso cerâmico e laje de cobertura impermeabilizada com membrana betuminosa

U - Transmitância térmica da cobertura [W/(m²K)] = 1,72; lajes = 1,79

ε - Emissividade da cobertura = 0,9

α - Absortância da cobertura = 0,2

**Propriedades térmicas dos materiais utilizados nas lajes e coberturas**

	Camadas	Materiais	Espessura (cm)	λ - Condutividade Térmica [W/(m.K)]	ρ - Densidade (Kg/m³)	c - Calor Específico (j/kg.k)	Rt - Resistência Térmica [(m².k)/w]
Laje entre pavimentos = 23 cm	1ª	Piso cerâmico	1	0,90	1300	920	-
	2ª	Contrapiso	2	1,15	1800	1000	-
	3ª	Laje de concreto	20	1,75	2400	1000	-
	4ª	Ar	10	-	-	-	0,21
	5ª	gesso	1,25	0,35	1000	840	-
Laje de cobertura = 22,8 cm	1ª	membrana betuminosa	1	0,23	1100	146	-
	2ª	Contrapiso	2	1,15	1800	1000	-
	3ª	Laje de concreto	20	1,75	2400	1000	-
	4ª	Ar	10	-	-	-	0,21
	5ª	gesso	1,25	0,35	1000	840	-

Fonte: elaborado pelo autor (2019).

Detalhamento do vidro Sunguard Royal Blue 40 - 8mmU - Transmitância térmica do vidro [W/(m²K)] = 3,35**Propriedades térmicas do vidro**

Tsol - Transmitância solar	Rsol - Reflectância solar	Tvis - Transmitância à radiação no espectro visível	Rvis - Reflectância visível	Emis1 - Emissividade na face 1	Emis2 - Emissividade na face 2	λ - Condutividade Térmica [W/(m.K)]
0,25	0,26	0,41	0,23	0,84	0,079	1



Fonte: elaborado pelo autor (2019).

APÊNDICE C - Especificação dos tipos de vidro para otimização

Detalhamento do vidro Sunguard Royal Blue 40 - 8mm

U - Transmitância térmica do vidro [W/(m²K)] = 3,35

Propriedades térmicas do vidro

Tsol - Transmitância solar	Rsol - Reflectância solar	Tvis - Transmitância à radiação no espectro visível	Rvis - Reflectância visível	Emis1 - Emissividade na face 1	Emis2 - Emissividade na face 2	λ - Condutividade Térmica [W/(m.K)]
0,25	0,26	0,41	0,23	0,84	0,079	1



Fonte: elaborado pelo autor (2019).

Detalhamento do vidro duplo Sunguard Royal Blue 40 - 8mm + ar - 12 mm + Sunguard HP 40 - 5mm

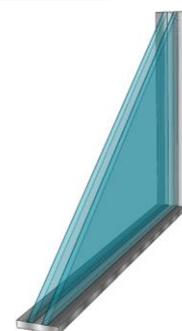
U - Transmitância térmica da composição [W/(m²K)] = 1,15

Propriedades térmicas do vidro Sunguard Royal Blue 40

Tsol - Transmitância solar	Rsol - Reflectância solar	Tvis - Transmitância à radiação no espectro visível	Rvis - Reflectância visível	Emis1 - Emissividade na face 1	Emis2 - Emissividade na face 2	λ - Condutividade Térmica [W/(m.K)]
0,25	0,26	0,41	0,23	0,84	0,079	1

Propriedades térmicas do vidro Sunguard HP 40

Tsol - Transmitância solar	Rsol - Reflectância solar	Tvis - Transmitância à radiação no espectro visível	Rvis - Reflectância visível	Emis1 - Emissividade na face 1	Emis2 - Emissividade na face 2	λ - Condutividade Térmica [W/(m.K)]
0,28	0,28	0,44	0,22	0,84	0,086	1



Fonte: elaborado pelo autor (2019).

Detalhamento do vidro duplo Sunguard HP 40 - 8mm + ar - 12 mm + Sunguard Solar Blue - 6mm

U - Transmitância térmica da composição [W/(m²K)] = 1,47

Propriedades térmicas do vidro Sunguard HP 40

Tsol - Transmitância solar	Rsol - Reflectância solar	Tvis - Transmitância à radiação no espectro visível	Rvis - Reflectância visível	Emis1 - Emissividade na face 1	Emis2 - Emissividade na face 2	λ - Condutividade Térmica [W/(m.K)]
0,28	0,28	0,44	0,22	0,84	0,086	1

Propriedades térmicas do vidro Sunguard Solar Blue

Tsol - Transmitância solar	Rsol - Reflectância solar	Tvis - Transmitância à radiação no espectro visível	Rvis - Reflectância visível	Emis1 - Emissividade na face 1	Emis2 - Emissividade na face 2	λ - Condutividade Térmica [W/(m.K)]
0,46	0,11	0,50	0,16	0,84	0,79	1



Fonte: elaborado pelo autor (2019).

Detalhamento do vidro Sunguard Sunguard HP 40 - 6mm (3 camadas) + ar - 12 mm (2camadas)

U - Transmitância térmica do vidro [W/(m²K)] = 0,67

Propriedades térmicas do vidro Sunguard HP 40

Tsol - Transmitância solar	Rsol - Reflectância solar	Tvis - Transmitância à radiação no espectro visível	Rvis - Reflectância visível	Emis1 - Emissividade na face 1	Emis2 - Emissividade na face 2	λ - Condutividade Térmica [W/(m.K)]
0,28	0,28	0,44	0,22	0,84	0,086	1



Fonte: elaborado pelo autor (2019).

APÊNDICE D - Especificação dos materiais de construção das paredes para otimização

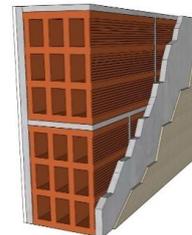
Composição da parede de vedação externa secundária

Alvenaria com tijolos de 9 furos quadrados (14 x 19 x 29 cm), reboco de 1,5 cm em ambas as faces, 0,5 cm de massa corrida na parte interna e cerâmica bege na parte externa

U - Transmitância térmica da parede [W/(m²K)] = 1,84

ε - Emissividade das paredes = 0,9

α - Absortância das paredes externas = 0,3



Propriedades térmicas dos materiais utilizados na alvenaria

	Camadas	Materiais	Espessura (cm)	λ - Condutividade Térmica [W/(m.K)]	ρ - Densidade (Kg/m³)	c - Calor Específico (j/kg.k)	Rt - Resistência Térmica [(m².k)/w]
Paredes internas e externas = 18 cm	1ª	Masas corrida	0,50	1,15	2000	1000	-
	2ª	Argam. (reboco)	1,5	1,15	1800	1000	-
	3ª	Cerâmica	1,25	0,9	1300	920	-
	4ª	Ar	3	-	-	-	0,16
	5ª	Cerâmica	1,25	0,9	1300	920	-
	6ª	Ar	3	-	-	-	0,16
	7ª	Cerâmica	1,25	0,9	1300	920	-
	8ª	Ar	3	-	-	-	0,16
	9ª	Cerâmica	1,25	0,9	1300	920	-
	9ª	Argam. (reboco)	1,5	1,15	1800	1000	-
	9ª	Revest. Cerâmico	0,5	0,9	1300	920	-

Fonte: elaborado pelo autor (2019).

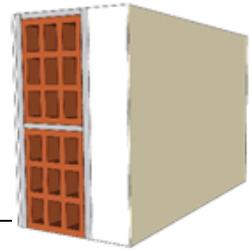
Composição da parede de vedação externa

Alvenaria com tijolos de 9 furos quadrados (14 x 19 x 29 cm), reboco de 1,5 cm em ambas as faces, 0,7 cm de massa corrida na parte interna e isolamento de poliestireno com ACM

U - Transmitância térmica da parede [W/(m²K)] = 0,34

ε - Emissividade das paredes = 0,90

α - Absortância das paredes externas = 0,4

**Propriedades térmicas dos materiais utilizados na alvenaria**

	Camadas	Materiais	Espessura (cm)	λ - Condutividade de Térmica [W/(m.K)]	ρ - Densidade (Kg/m³)	c - Calor Específico (j/ kg.k)	Rt - Resistência Térmica [(m².k)/w]
Paredes externas = 26 cm	1ª	Masas corrida	0,70	1,15	2000	1000	-
	2ª	Argam. (reboco)	1,5	1,15	1800	1000	-
	3ª	Cerâmica	1,25	0,9	1300	920	-
	4ª	Ar	3	-	-	-	0,16
	5ª	Cerâmica	1,25	0,9	1300	920	-
	6ª	Ar	3	-	-	-	0,16
	7ª	Cerâmica	1,25	0,9	1300	920	-
	8ª	Ar	3	-	-	-	0,16
	9ª	Cerâmica	1,25	0,9	1300	920	-
	10ª	Argam. (reboco)	1,5	1,15	1800	1000	-
	11ª	poliestireno	8	0,035	40	142	-
	12ª	ACM	0,3	230	2700	880	-

Fonte: elaborado pelo autor (2019).

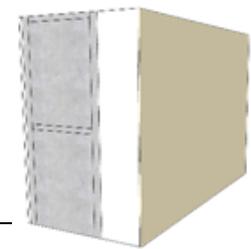
Composição da parede de vedação externa

Alvenaria com bloco de concreto de 2 furos quadrados (14 x 19 x 29 cm), reboco de 1,5 cm em ambas as faces, 0,7 cm de massa corrida na parte interna e isolamento de poliestireno com ACM

U - Transmitância térmica da parede [W/(m²K)] = 0,38

ε - Emissividade das paredes = 0,90

α - Absortância das paredes externas = 0,4

**Propriedades térmicas dos materiais utilizados na alvenaria**

	Camadas	Materiais	Espessura (cm)	λ - Condutividade de Térmica [W/(m.K)]	ρ - Densidade (Kg/m³)	c - Calor Específico (j/ kg.k)	Rt - Resistência Térmica [(m².k)/w]
Paredes externas = 26 cm	1ª	Masas corrida	0,70	1,15	2000	1000	-
	2ª	Argam. (reboco)	1,5	1,15	1800	1000	-
	3ª	bloco	2,5	1,75	2400	1000	-
	4ª	Ar	9	-	-	-	0,17
	5ª	bloco	2,5	1,75	2400	1000	-
	6ª	Argam. (reboco)	1,5	1,15	1800	1000	-
	7ª	poliestireno	8	0,035	40	142	-
	8ª	ACM	0,3	230	2700	880	-

Fonte: elaborado pelo autor (2019).

Composição da parede de vedação externa

Alvenaria com bloco de concreto de 2 furos quadrados (14 x 19 x 29 cm), reboco de 1,5 cm em ambas as faces, 0,7 cm de massa corrida na parte

U - Transmitância térmica da parede [W/(m²K)] = 2,75

ε - Emissividade das paredes = 0,90

α - Absortância das paredes externas = 0,4

**Propriedades térmicas dos materiais utilizados na alvenaria**

	Camadas	Materiais	Espessura (cm)	λ - Condutividade de Térmica [W/(m.K)]	ρ - Densidade (Kg/m³)	c - Calor Específico (j/ kg.k)	Rt - Resistência Térmica [(m².k)/w]
Paredes externas = 26 cm	1ª	Masas corrida	0,70	1,15	2000	1000	-
	2ª	Argam. (reboco)	1,5	1,15	1800	1000	-
	3ª	bloco	2,5	1,75	2400	1000	-
	4ª	Ar	9	-	-	-	0,17
	5ª	bloco	2,5	1,75	2400	1000	-
	6ª	Argam. (reboco)	1,5	1,15	1800	1000	-
	7ª	Revest. Cerâmico	0,5	0,9	1300	920	-

Fonte: elaborado pelo autor (2019).

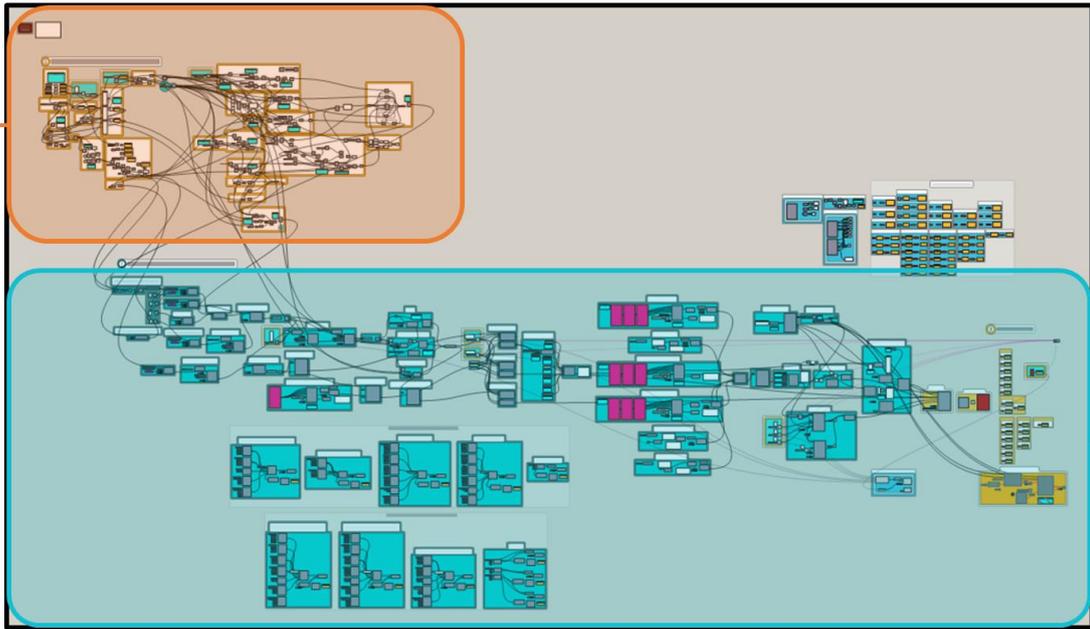
**APÊNDICE E -
Especificação do ar condicionado para a otimização**

<i>Ar condicionado central VRF Samsung AM180FXWANR</i>			
Resfriamento		Aquecimento	
COP	Capacidade (kWh)	COP	capacidade (kWh)
5,67	50,40	6,05	56,7

Fonte: elaborado pelo autor (2019).

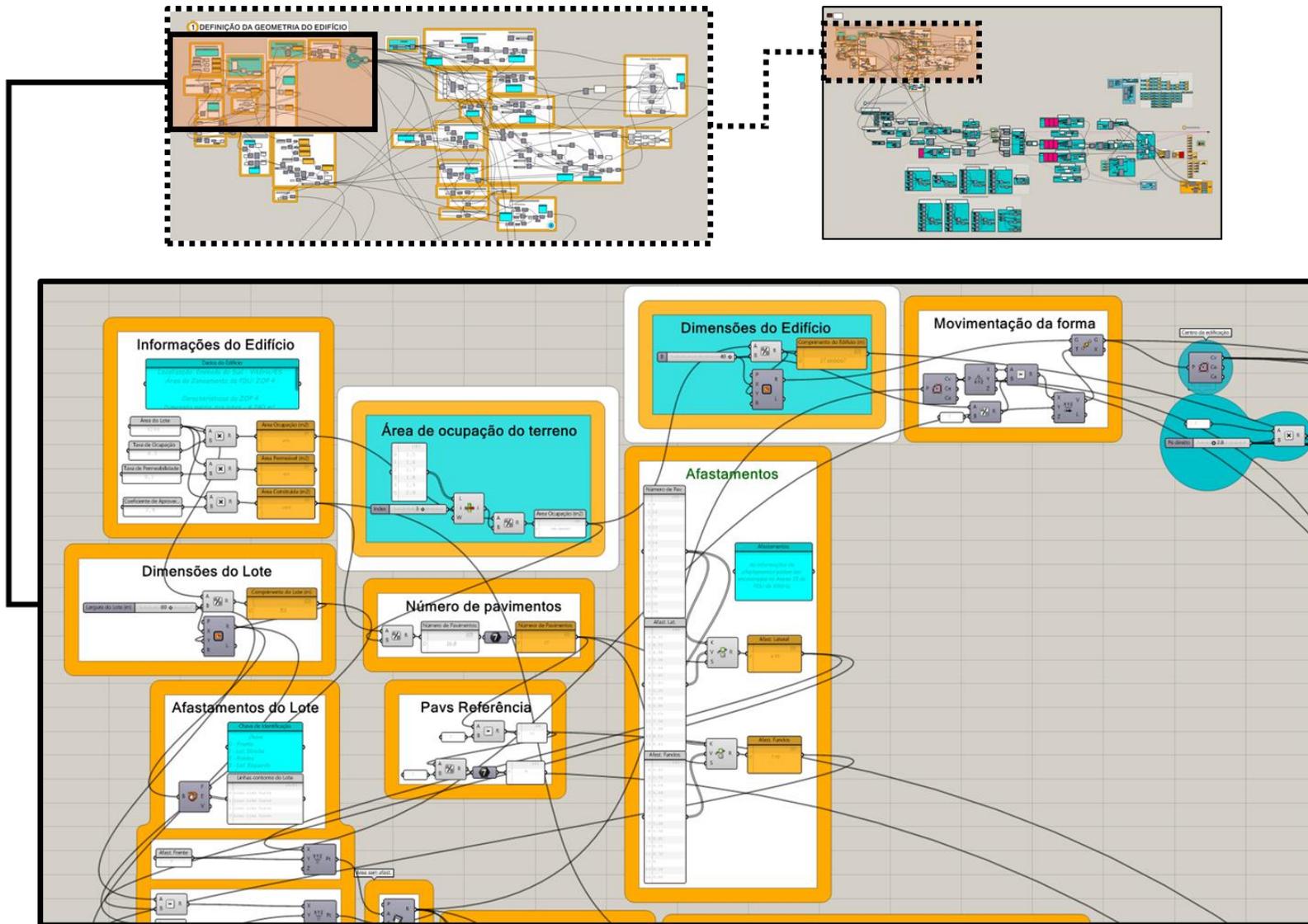
APÊNDICE F

Definições da forma e relações geométricas

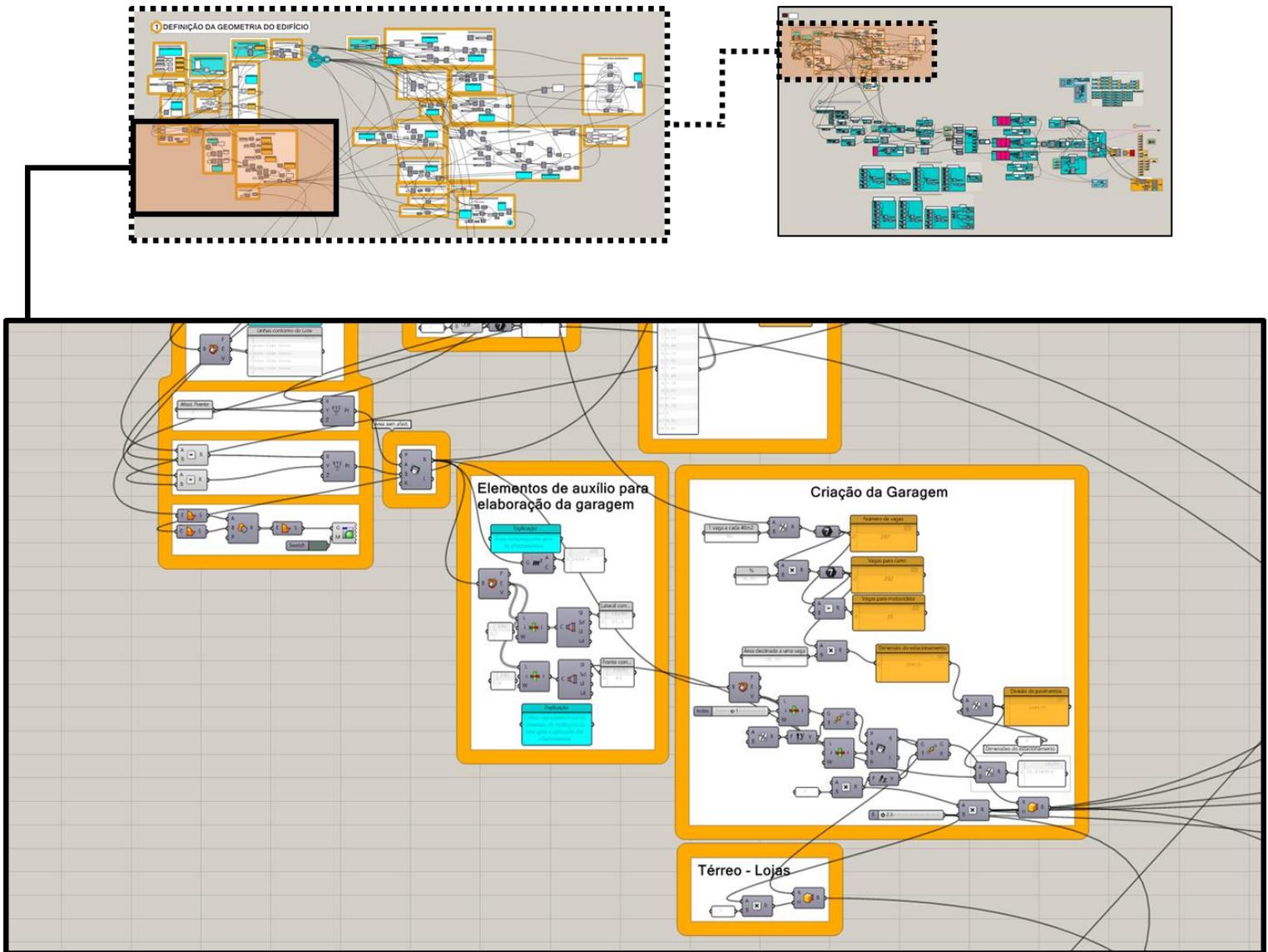


Modelagem energética

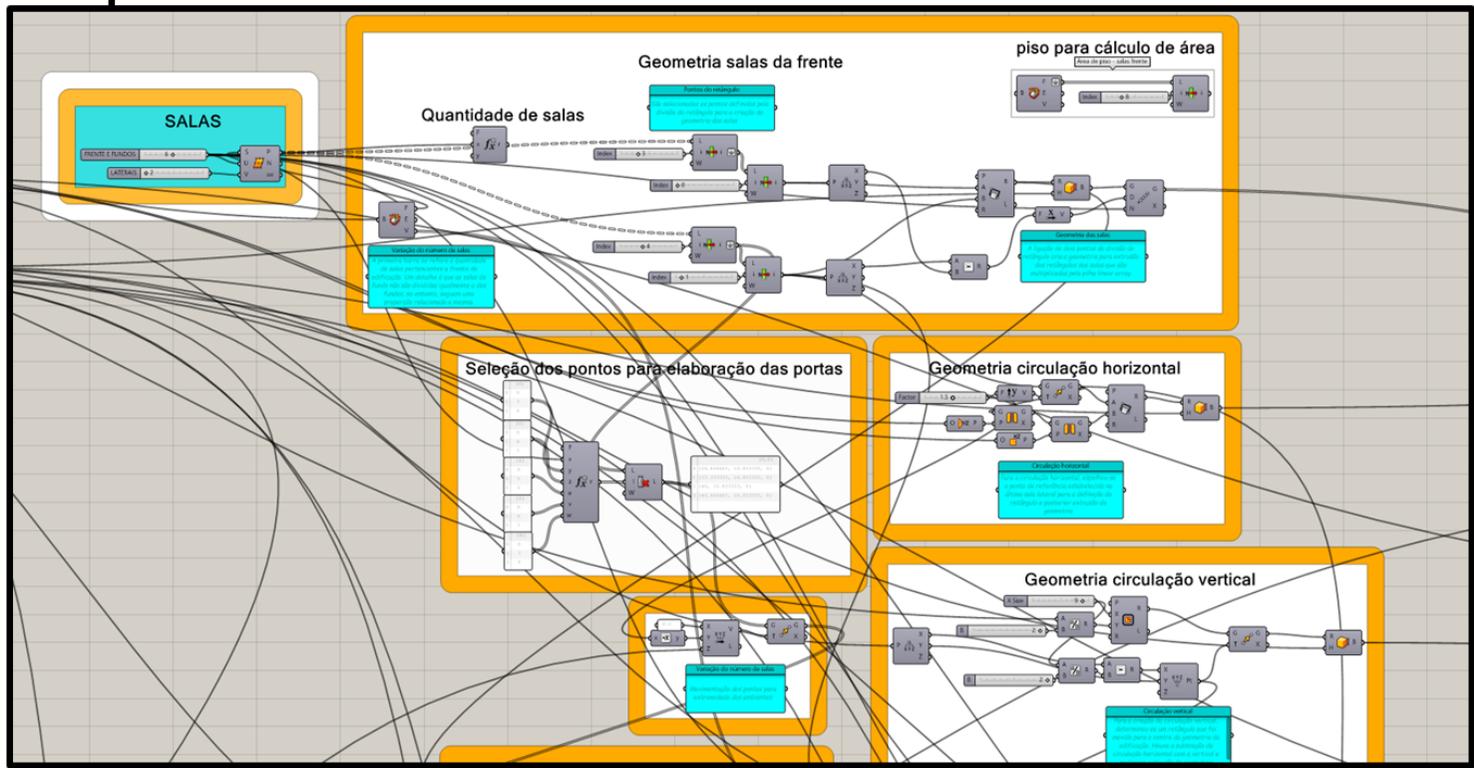
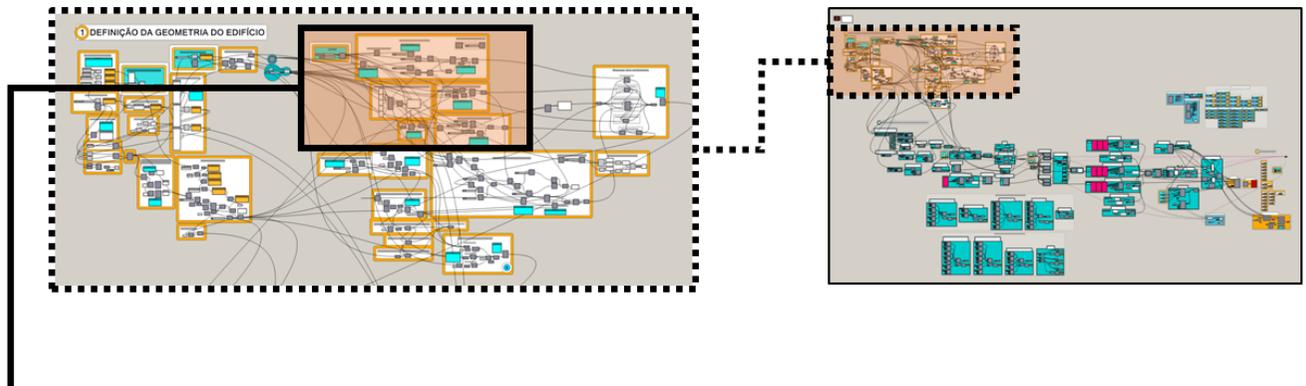
Visão geral do sistema generativo de projeto



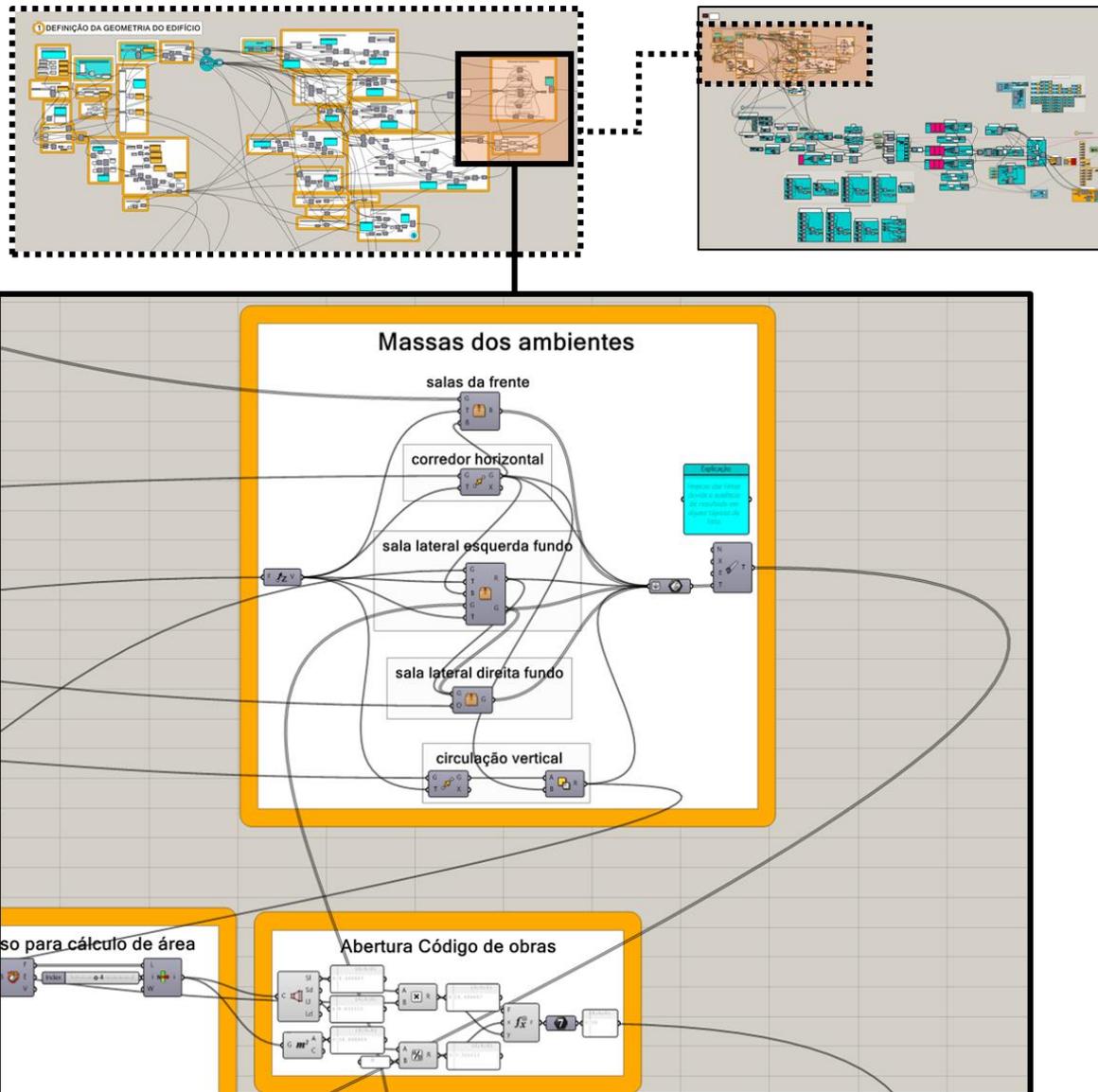
Definições iniciais da geometria do edifício



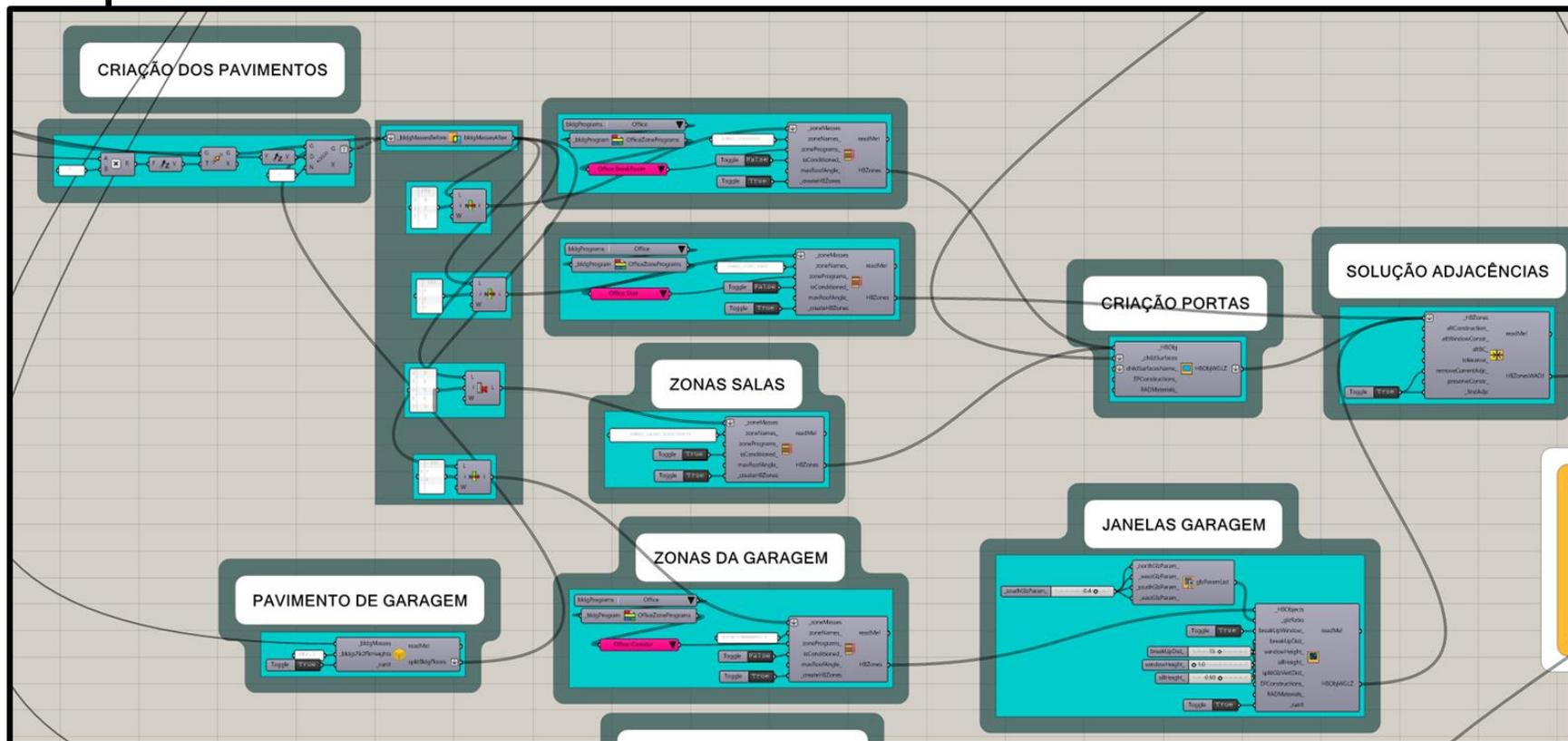
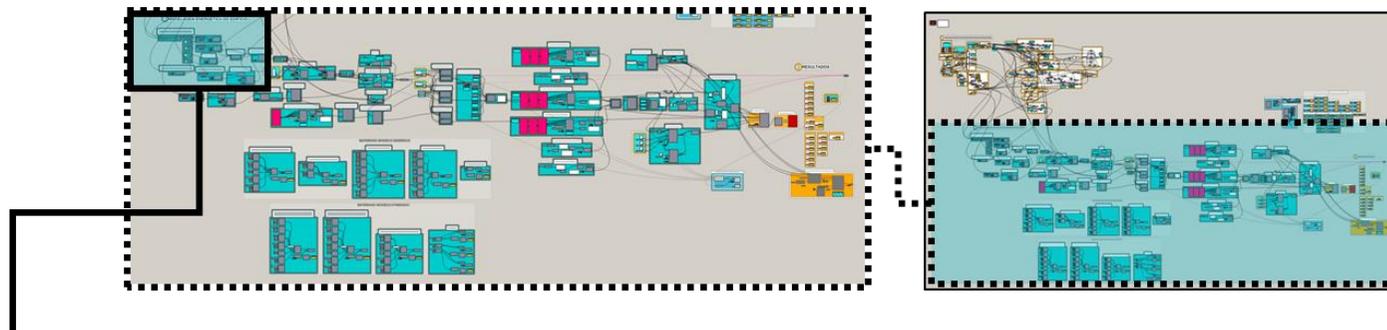
Criação da garagem



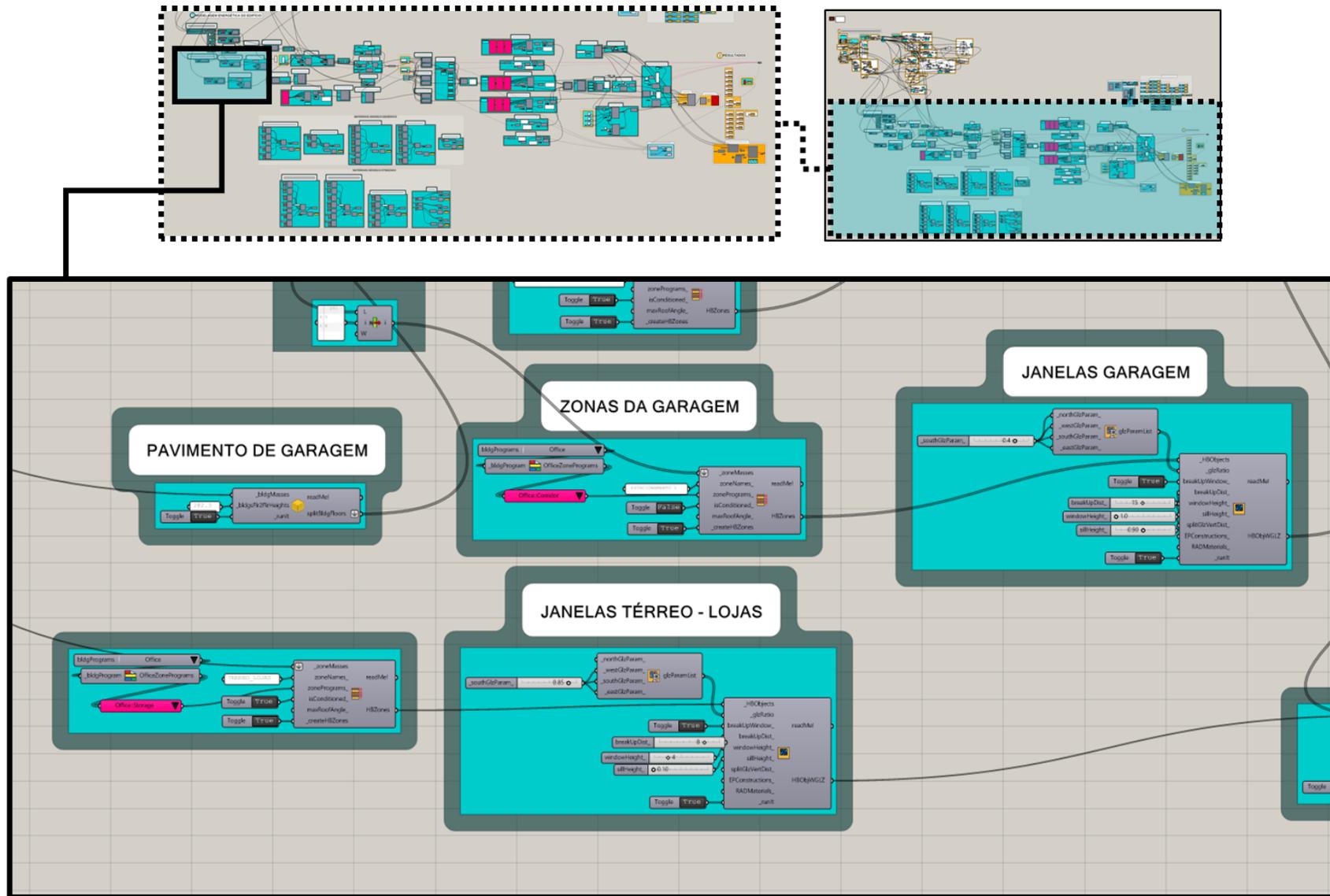
Criação dos ambientes internos



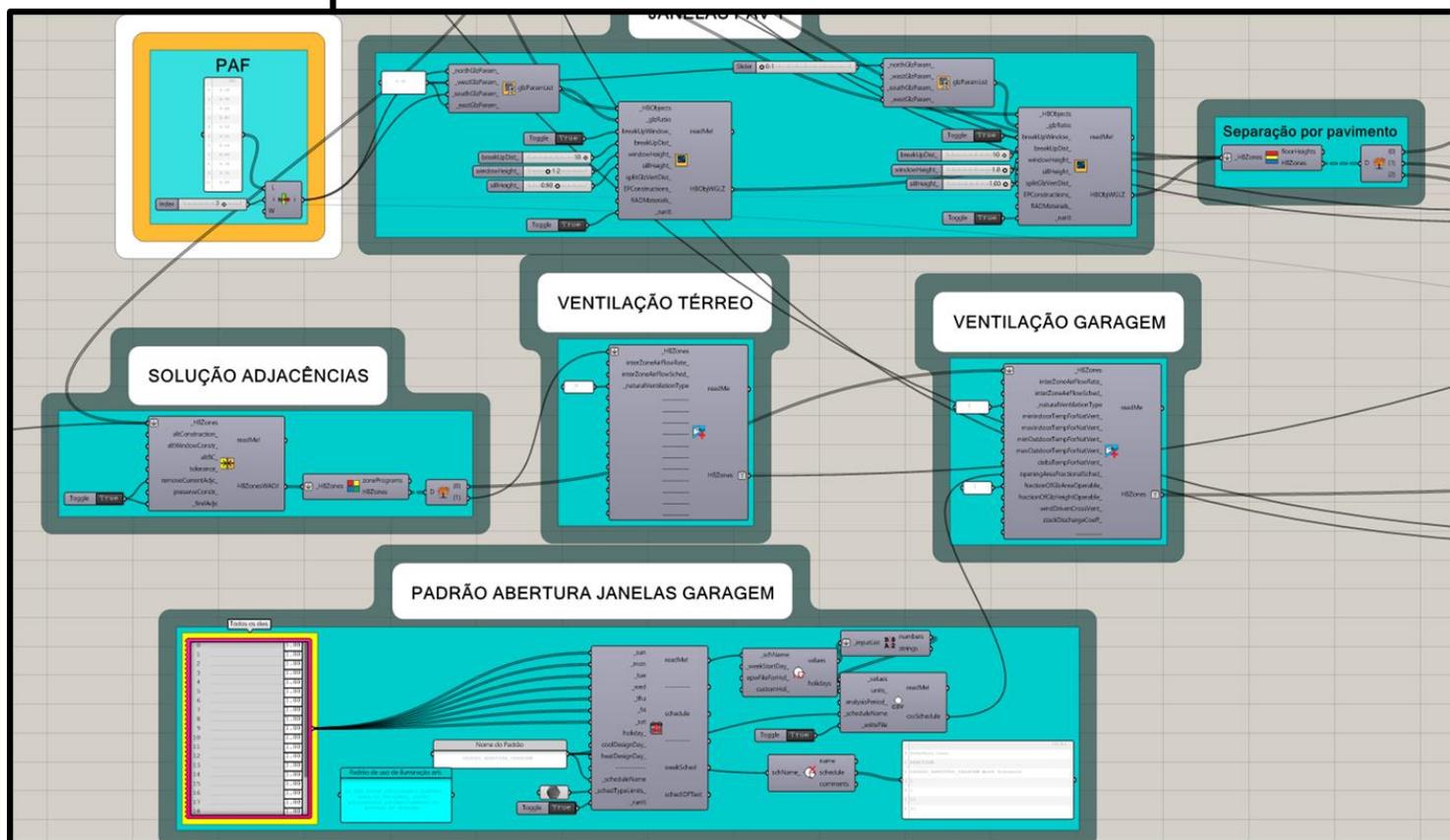
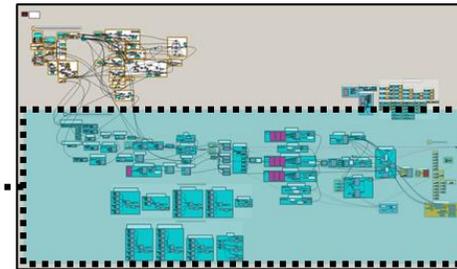
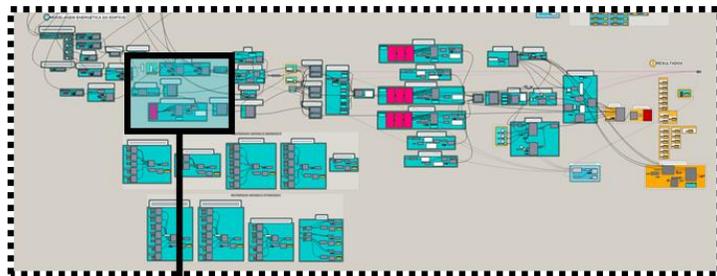
Criação dos volumes dos ambientes e delimitação do código de obras



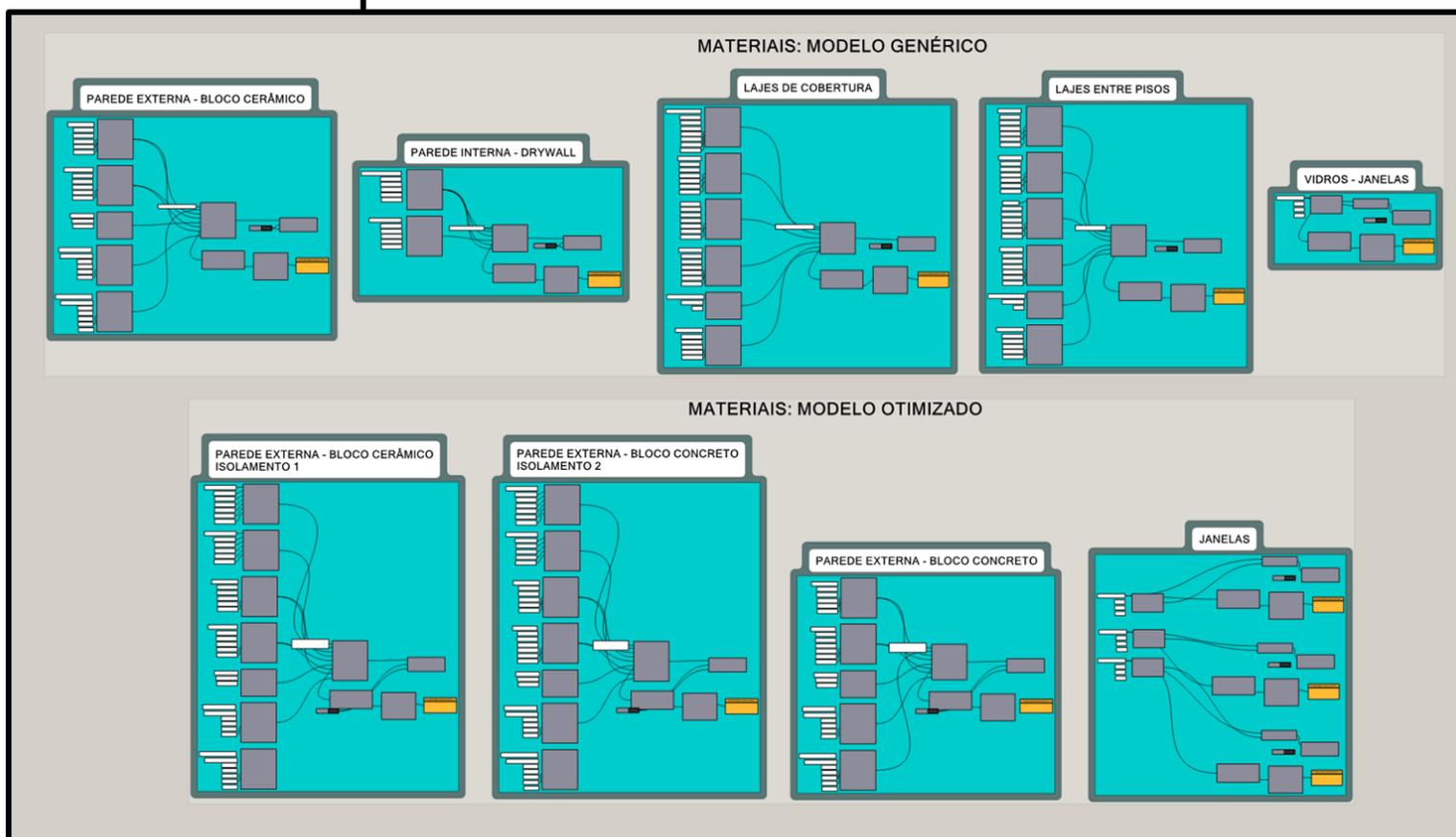
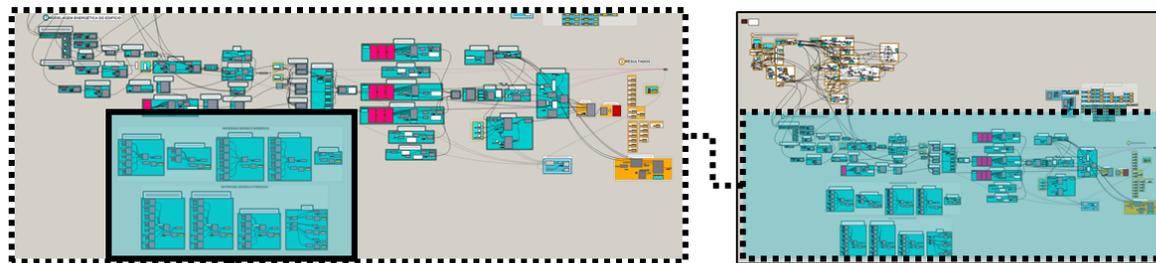
Definição das zonas térmicas, portas e adjacências



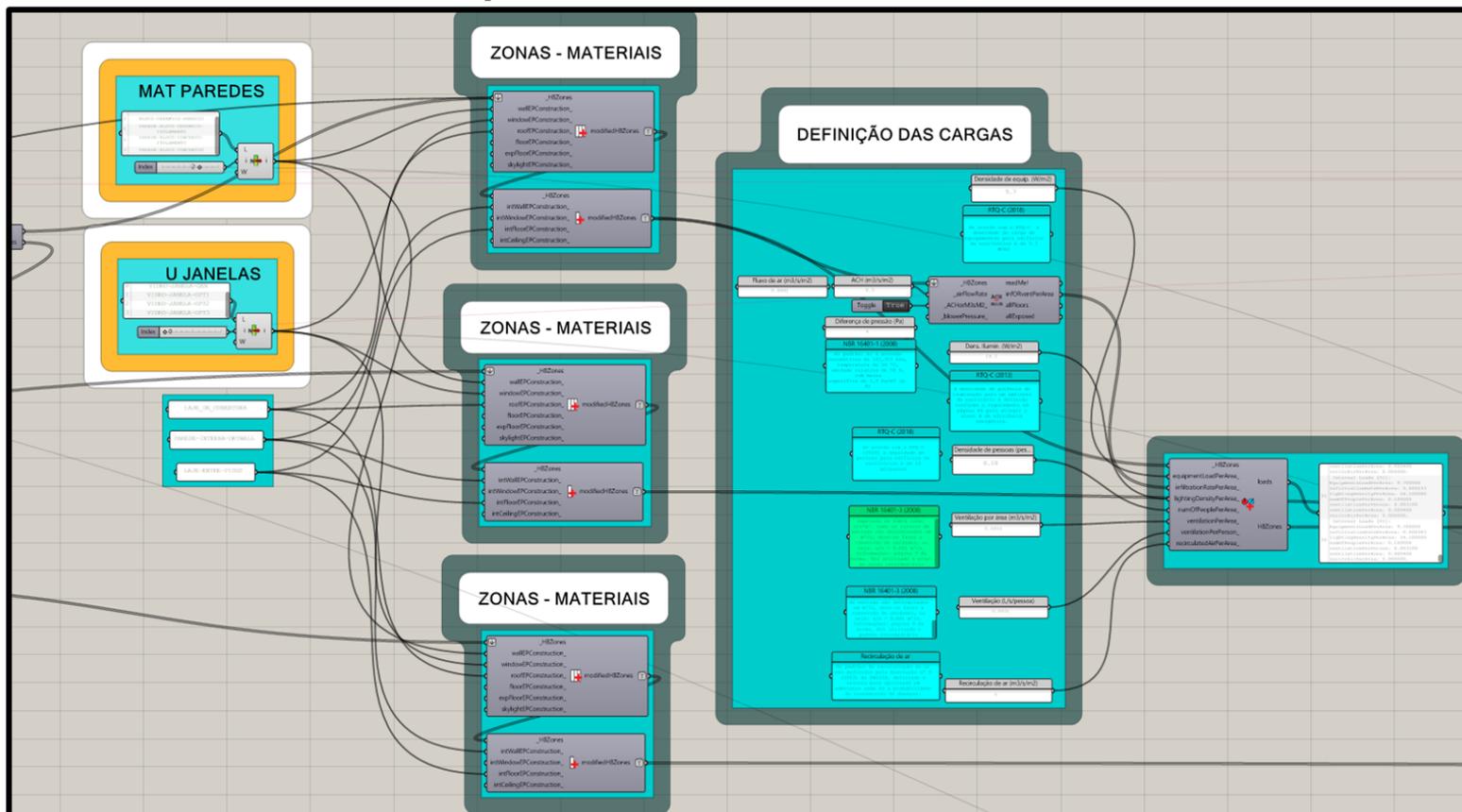
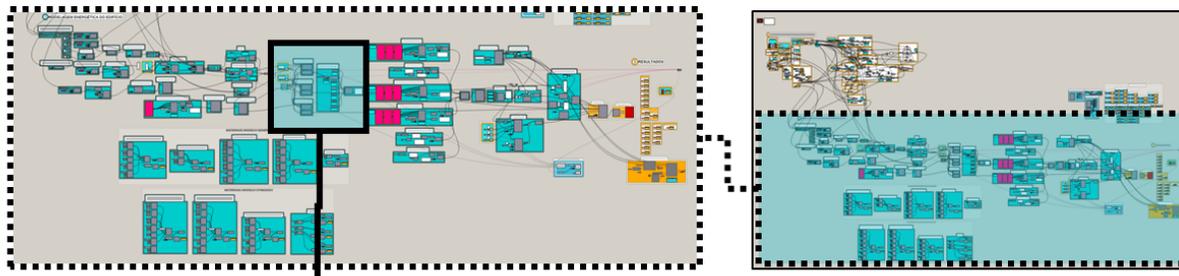
Zonas e janelas da garagem



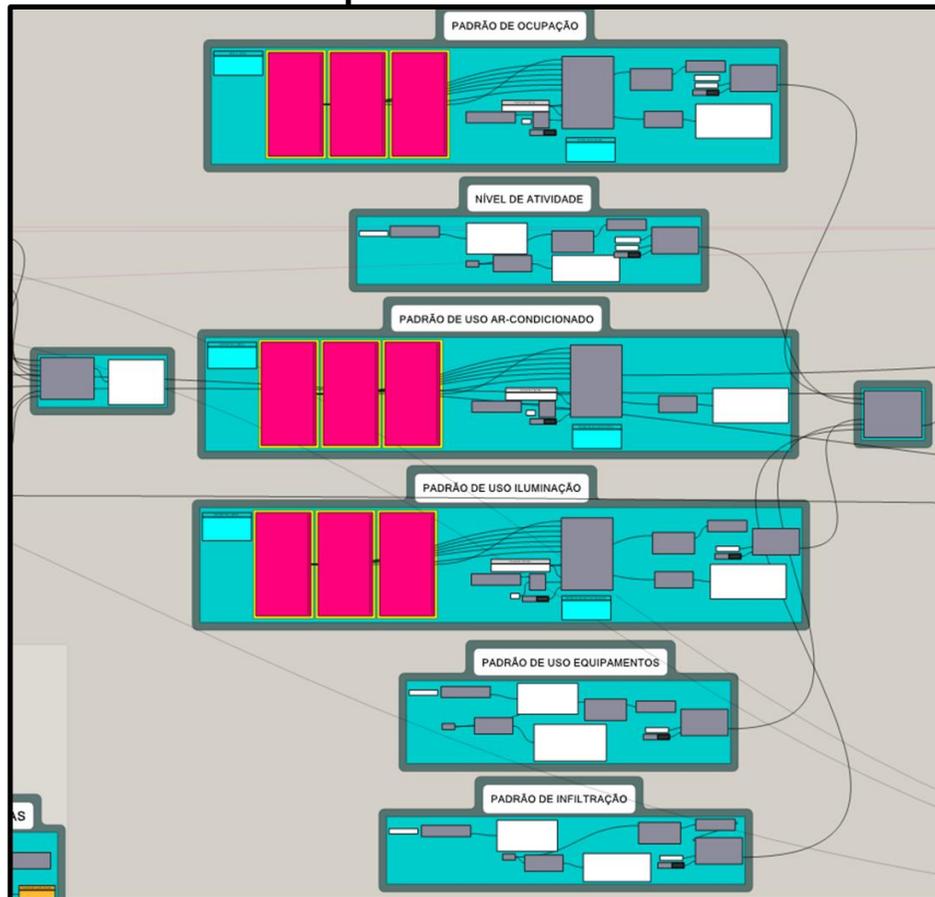
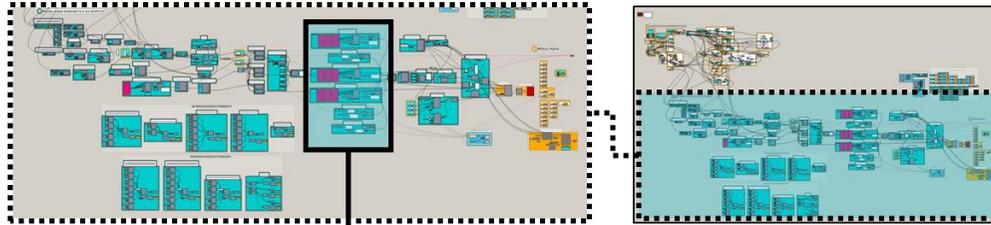
Definição das janelas



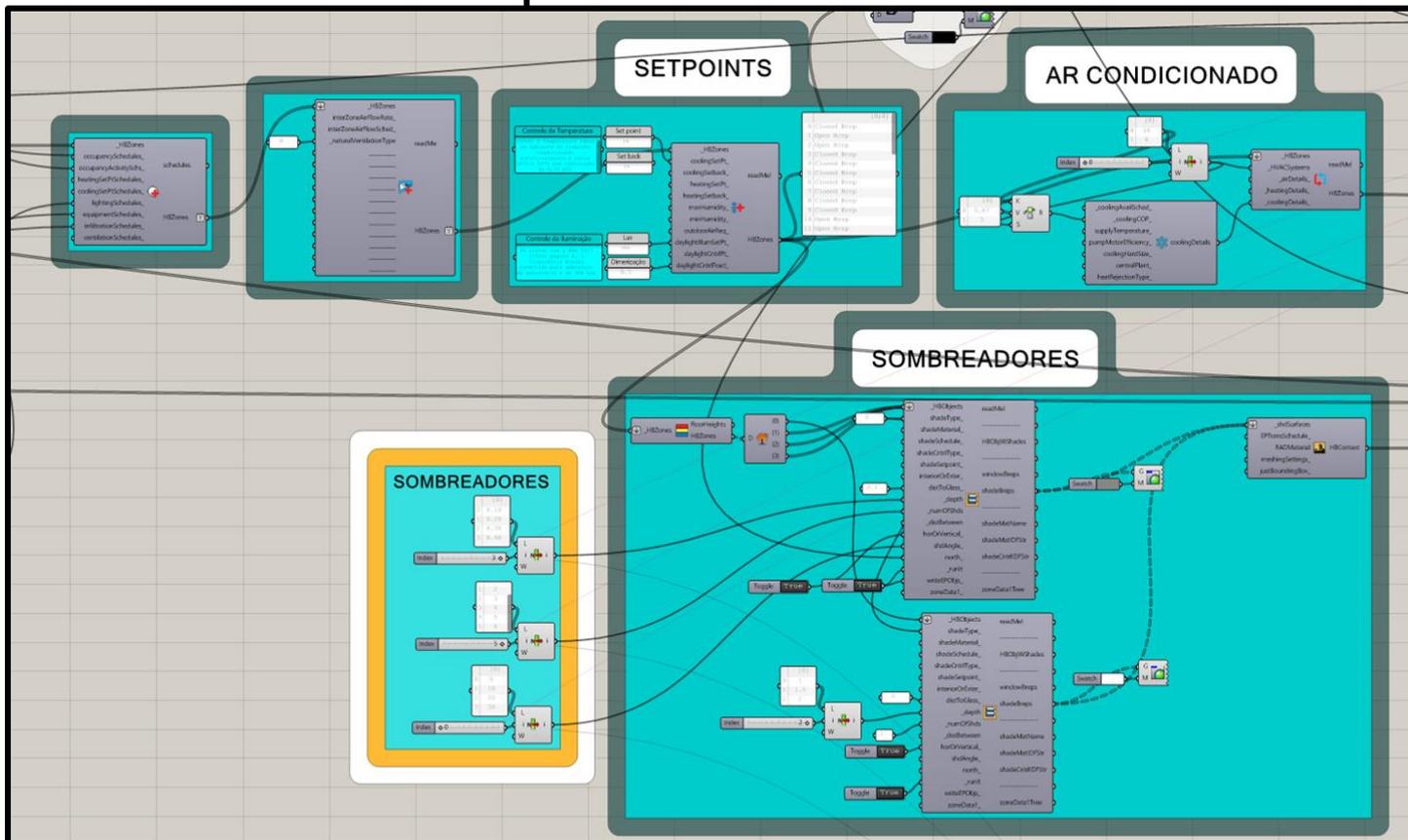
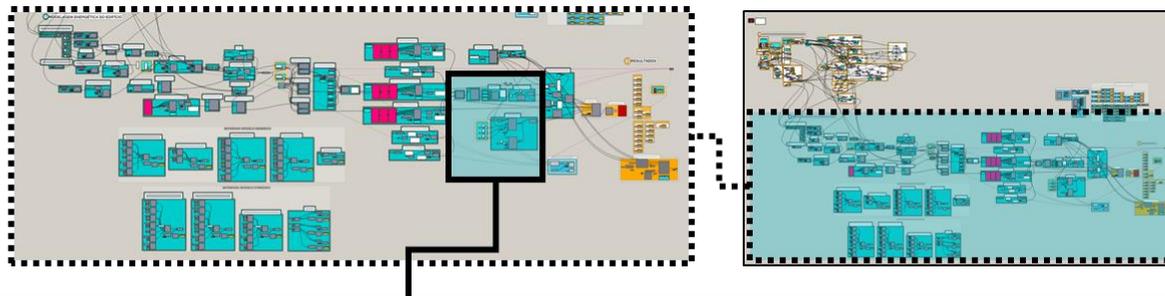
Criação dos materiais



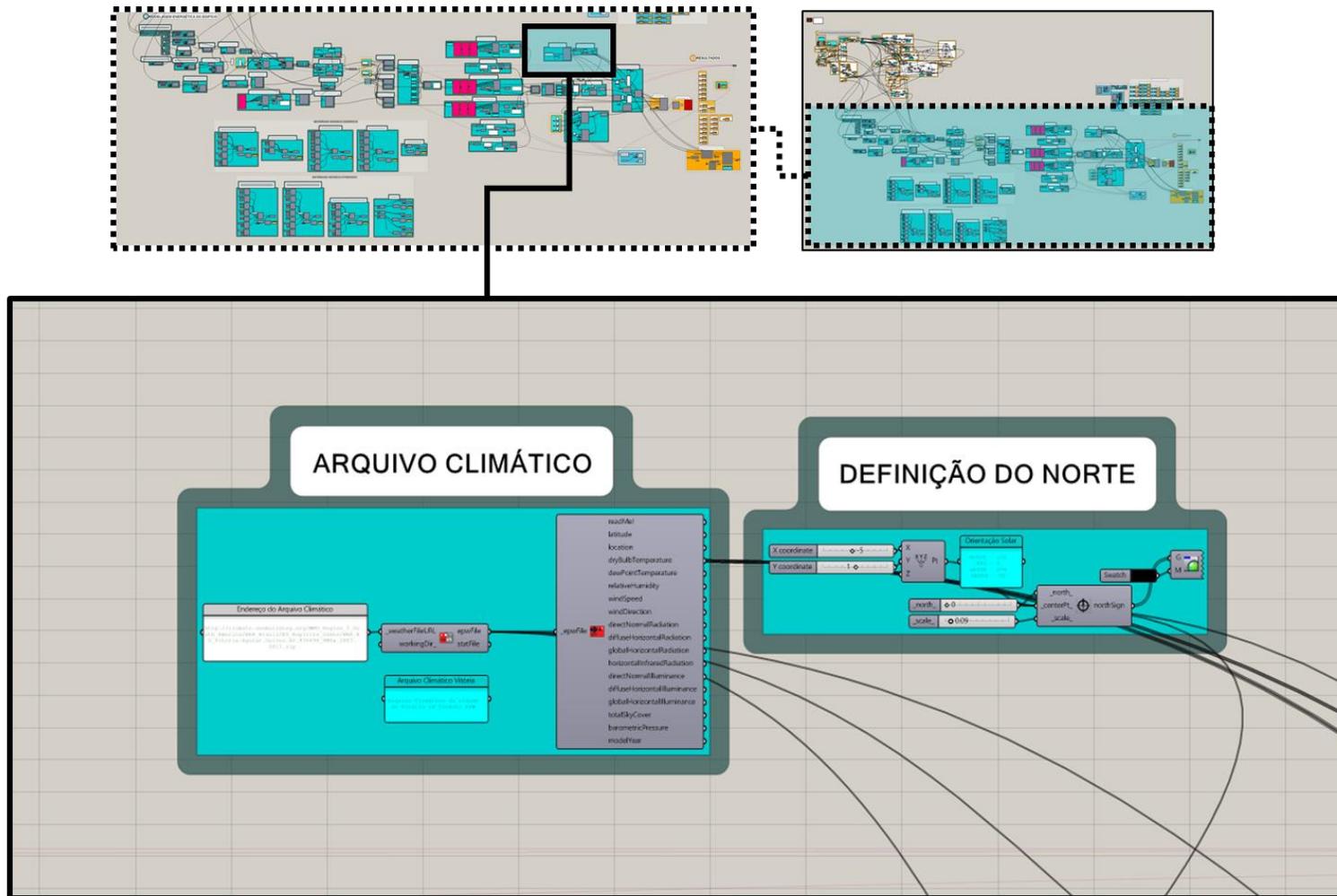
Definições das cargas das zonas



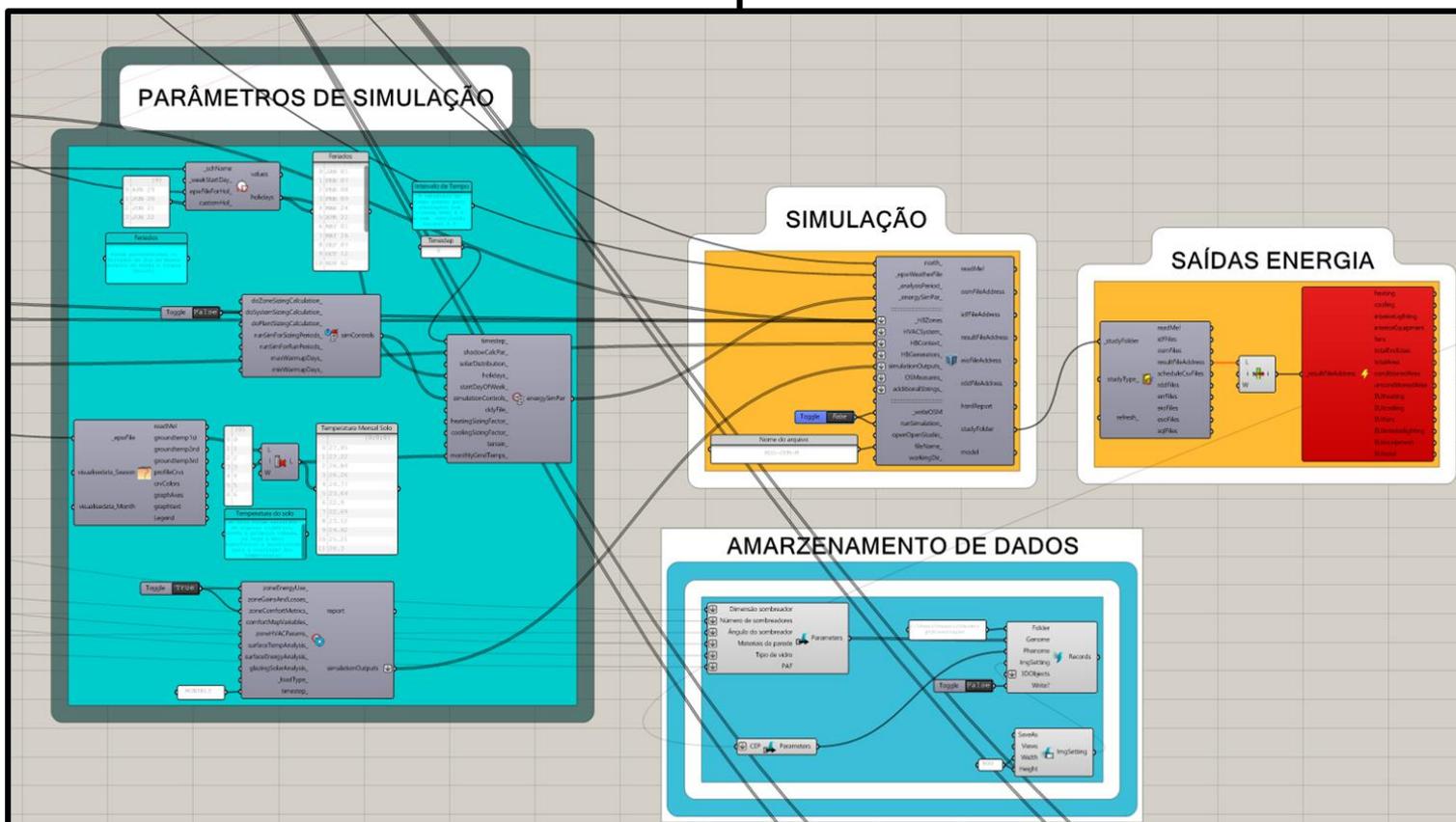
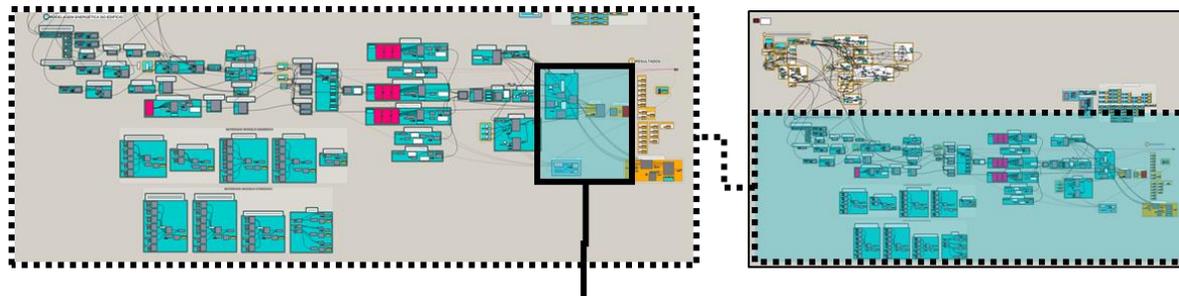
Definição dos padrões de uso



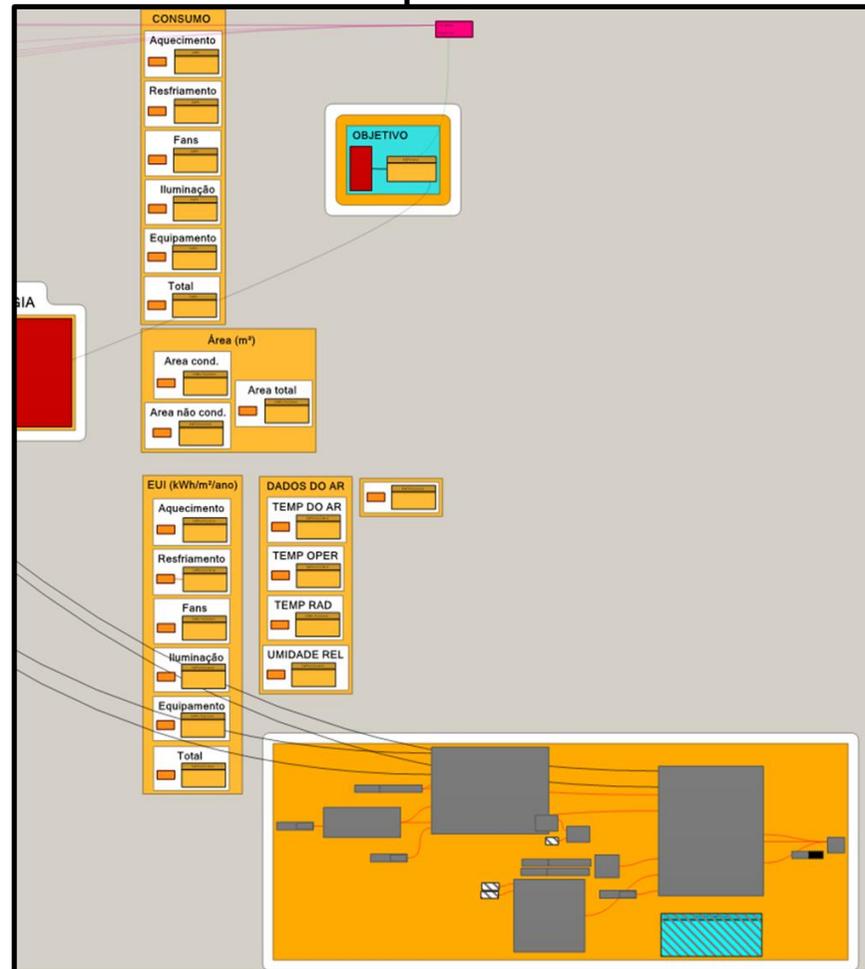
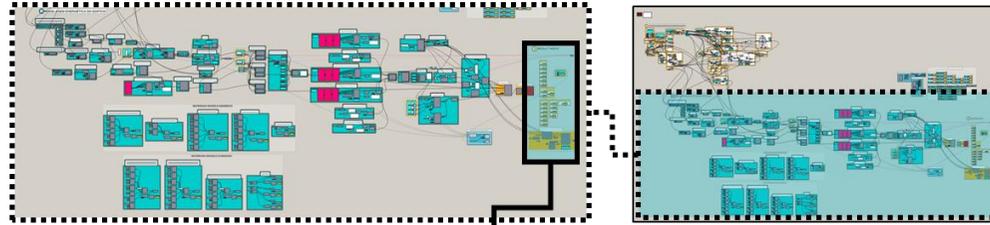
Sistema de ar condicionado, sombreadores e setpoint



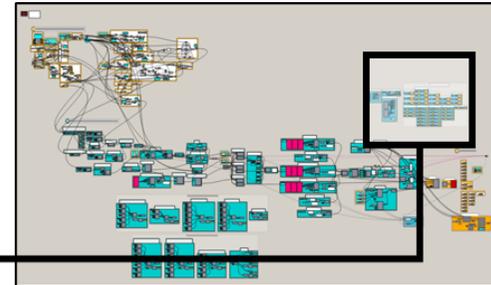
Arquivo climático e definição do norte



Parâmetros de simulação, armazenamento dos dados das variáveis



Dados de saída do modelo



VARIÁVEIS DE PROJETO

PAFt

FATOR FORMA (FF)

VISUALIZAÇÃO

<p>ÁREA PAVTO TIPO</p>	<p>ÁREA DAS SALAS</p> <p>Salas da frente</p> <p>Salas laterais frente</p> <p>Salas laterais fundos</p> <p>Salas fundos</p>	<p>PAF</p> <p>PAF principal</p> <p>PAF secundário</p> <p>PAF total</p>	<p>SOMBREADORES</p> <p>Dimensão dos brises</p> <p>Número de brises</p> <p>Angulação dos brises</p>	
<p>Nº PAVTOS</p>	<p>Nº SALAS</p> <p>Quantidade de salas</p>	<p>MATERIAIS</p> <p>Materiais da parede</p> <p>Tipos de vidro da janela</p>		
<p>ÁREA DO EDIFÍCIO</p> <p>Area cond.</p> <p>Area não cond.</p> <p>Area total</p>	<p>CONSUMO</p> <p>Aquecimento</p> <p>Resfriamento</p> <p>Fans</p> <p>Iluminação</p> <p>Equipamento</p> <p>Total</p>	<p>EUI</p> <p>Aquecimento</p> <p>Resfriamento</p> <p>Fans</p> <p>Iluminação</p> <p>Equipamento</p> <p>Total</p>	<p>DADOS DO AR</p> <p>TEMP DO AR</p> <p>TEMP OPER</p> <p>TEMP RAD</p> <p>UMIDADE REL</p>	<p>CEP</p>

Definições da visualização do modelo e variáveis do projeto

APÊNDICE G -

Cálculo para a classificação do nível de desempenho energético dos modelos computacionais

Cálculo para o modelo genérico					
Variável	Unidade	Modelo real	Modelo de referência		
Consumo de energia térmica - sistema de condicionamento de ar (CCA _t)	kWh/ano	1.160.488,88	1.544.958,33		
Consumo total de energia térmica (CTE _t)	kWh/ano	1.160.488,88	1.544.958,33		
Consumo do sistema de iluminação (CIL)	kWh/ano	763878,33	763878,33		
Consumo de equipamentos/tomadas (CEQ)	kWh/ano	915949	915949		
Geração local de energia renovável local (Gee)	kWh/ano	0	0		
Consumo de energia elétrica do sistema de ventilação - fans	kWh/ano	63067,17	75895,05		
Consumo de energia elétrica do sistema de condicionamento de ar (CCA _e)		1223556,05	1620853,38		
Consumo total de energia elétrica (CTE _e)	kWh/ano	2903383,38	3300680,71		
Consumo de energia primária da edificação selecionada (CEP _{real/ref})	kWh/ano	5921951,176	6980543,299		
Percentual de consumo de energia primária - PRCEP real-D	%	15,16			
Área da envoltória (A _{env})	m ²	5430,3			
Volume total da edificação	V _{tot}	38760			
Fator de forma (FF)	m ² /m ³	0,18			
Coefficiente de redução de consumo de energia primária (CRCEP _{d-a})	-	0,3			
Coefficiente de representação dos intervalos entre as classes de eficiência (i)	kWh/ano	698054,33			
Classificação do nível de eficiência energética da edificação					
Classe de eficiência	A	B	C	D	E
Limite superior	-	4886380,31	5584434,64	6282488,97	6980543,30
Limite inferior	4886380,31	5584434,64	6282488,97	6980543,30	-
Etiqueta da edificação	C				

Fonte: elaborado pelo autor (2019).

Cálculo para o modelo de otimização restrita					
Variável	Unidade	Modelo real	Modelo de referência		
Consumo de energia térmica - sistema de condicionamento de ar (CCA _t)	kWh/ano	706.732	1.544.958,33		
Consumo total de energia térmica (CTE _t)	kWh/ano	706.732	1.544.958,33		
Consumo do sistema de iluminação (CIL)	kWh/ano	601104	763878,33		
Consumo de equipamentos/tomadas (CEQ)	kWh/ano	915949	915949		
Geração local de energia renovável local (G _{ee})	kWh/ano	0	0		
Consumo de energia elétrica do sistema de ventilação - fans	kWh/ano	297977	75895,05		
Consumo de energia elétrica do sistema de condicionamento de ar (CCA _e)		1004709	1620853,38		
Consumo total de energia elétrica (CTE _e)	kWh/ano	2521762	3300680,71		
Consumo de energia primária da edificação selecionada (CEP _{real/ref})	kWh/ano	4812224,4	6980543,299		
Percentual de consumo de energia primária - PRCEP real-D	%	31,06			
Área da envoltória (A _{env})	m ²	5430,3			
Volume total da edificação	V _{tot}	38760			
Fator de forma (FF)	m ² /m ³	0,18			
Coefficiente de redução de consumo de energia primária (CRCEP _{d-a})	-	0,3			
Coefficiente de representação dos intervalos entre as classes de eficiência (i)	kWh/ano	698054,33			
Classificação do nível de eficiência energética da edificação					
Classe de eficiência	A	B	C	D	E
Limite superior	-	4886380,31	5584434,64	6282488,97	6980543,30
Limite inferior	4886380,31	5584434,64	6282488,97	6980543,30	-
Etiqueta da edificação	A				

Fonte: elaborado pelo autor (2019).

Cálculo para o modelo de otimização abrangente					
Variável	Unidade	Modelo real	Modelo de referência		
Consumo de energia térmica - sistema de condicionamento de ar (CCA _t)	kWh/ano	649.521,86	1.544.958,33		
Consumo total de energia térmica (CTE _t)	kWh/ano	649.521,86	1.544.958,33		
Consumo do sistema de iluminação (CIL)	kWh/ano	608452,08	763878,33		
Consumo de equipamentos/tomadas (CEQ)	kWh/ano	716591,84	915949		
Geração local de energia renovável local (G _{ee})	kWh/ano	0	0		
Consumo de energia elétrica do sistema de ventilação - fans	kWh/ano	275229,97	75895,05		
Consumo de energia elétrica do sistema de condicionamento de ar (CCA _e)		924751,83	1620853,38		
Consumo total de energia elétrica (CTE _e)	kWh/ano	2249795,75	3300680,71		
Consumo de energia primária da edificação selecionada (CEP _{real/ref})	kWh/ano	4314147,246	6980543,299		
Percentual de consumo de energia primária - PRCEP real-D	%	38,20			
Área da envoltória (A _{env})	m ²	5430,3			
Volume total da edificação	V _{tot}	38760			
Fator de forma (FF)	m ² /m ³	0,15			
Coefficiente de redução de consumo de energia primária (CRCEP _{d-a})	-	0,3			
Coefficiente de representação dos intervalos entre as classes de eficiência (i)	kWh/ano	698054,33			
Classificação do nível de eficiência energética da edificação					
Classe de eficiência	A	B	C	D	E
Limite superior	-	4886380,31	5584434,64	6282488,97	6980543,30
Limite inferior	4886380,31	5584434,64	6282488,97	6980543,30	-
Etiqueta da edificação	A				

Fonte: elaborado pelo autor (2019).